

Измерение и анализ механических колебаний

DK
Russian



Брюль и Къер

Уважаемые читатели!

Излагаемый в данной брошюре материал является введением в область измерений и анализа механических колебаний. Это пособие было издано компанией Брюль и Къер в восьмидесятих годах прошлого века. Конечно, в настоящее время номенклатура измерительных датчиков претерпела значительные изменения. Появились датчики со встроенной электроникой, интеллектуальные акселерометры с технологией TEDS и многое другое. Появилось также и новое измерительное оборудование. Однако и сегодня это популярное в свое время пособие не потеряло своей актуальности. Мы надеемся, что брошюра даст Вам ответы на большинство чисто практических вопросов, возникающих в процессе измерения вибрации.

Московский Технический Центр Компании Brüel&Kjær.
103287, Москва Петровско-Разумовский пр. 29, 4 этаж
Тел. (095)212-39-03; Факс(095)733-90-48;
E-mail: info@asmtm.dol.ru

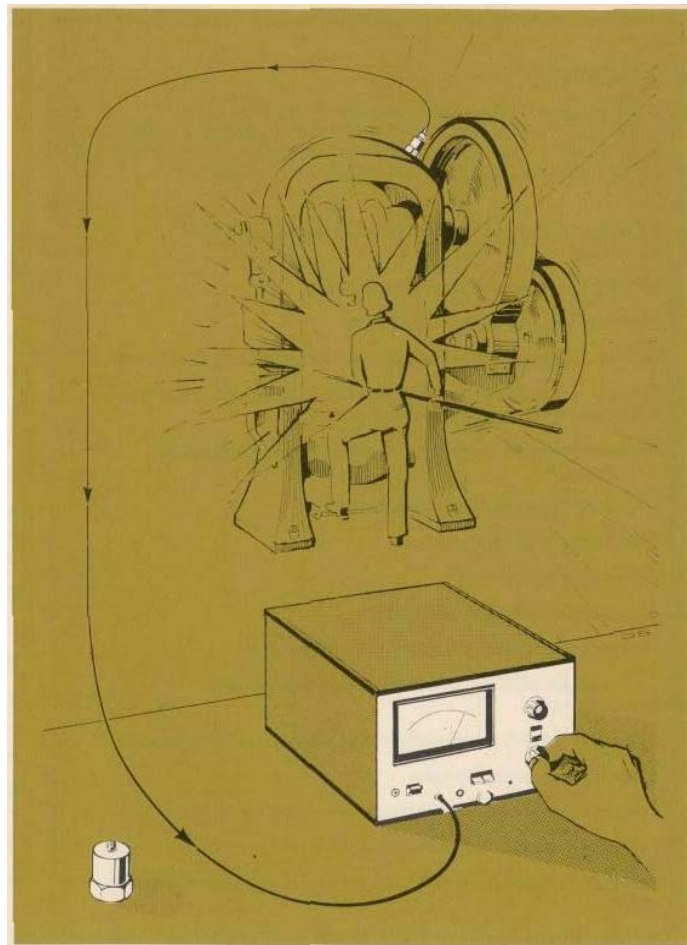
Введение			
Предлагаемая брошюра дает ответ на большинство основных вопросов, относящихся к измерению и анализу механических колебаний и соответствующей аппаратуре. В брошюре кратко рассматриваются и излагаются следующие вопросы :			
	Стр.		Стр.
Причины и цели измерения и анализа механических колебаний	2 и 3	Другие влияния внешней среды	20 и 21
Источники механических колебаний	3	Калибровка акселерометров	22
Природа механических колебаний	4	Простой калибратор	23
Количественная оценка амплитуд механических колебаний	5	Измерение силы и механического импеданса	24
Параметры механических колебаний: ускорение, скорость и смещение и соответствующие единицы	6	Логарифмические шкалы и децибелы	25
Условия выбора одного из параметров механических колебаний	7	Причины применения предусилителей	26
Пьезоэлектрический акселерометр	8	Виброметр	27
Конструкция акселерометров	9	Частотный анализ	28
Типы акселерометров	10	Частотный анализ анализатором с постоянной шириной полосы пропускания и постоянной относительной шириной полосы пропускания	29
Характеристики акселерометров	11	Ширина полосы пропускания частотного анализатора	30
Рабочий частотный диапазон акселерометров	12	Определение ширины полосы пропускания фильтра	31
Элиминация ошибок, обусловленных резонансом акселерометра	13	Виброизмерительная аппаратура	32
Определение места крепления и положения акселерометра	14	Регистрация результатов	33
Крепление акселерометров	15 и 16	Применение результатов измерения и анализа механических колебаний	34
Влияния условий внешней среды — общие сведения	17	Механические колебания в качестве показателя состояния машин	35
Влияния условий внешней среды — температура	18	Таблицы для отыскания неисправностей	36 и 37
Влияния условий внешней среды — шум соединительных кабелей	19	Механические колебания и организм человека	38 и 39

Общие сведения

Инженеры и техники занимаются вопросами, связанными с уменьшением механических колебаний и виброизоляции, уже с времени разработки и производства первых машин и станков, в частности машин с механическим приводом.

Необходимость точного измерения и анализа механических колебаний возникла с первых шагов разработки и конструирования машин, учитывающих вопросы амортизации механических колебаний и виброизоляции. Исследование механических колебаний прочных машин медленного действия в прошлом основывалось на опыте инженеров-конструкторов и применении несложных оптических приборов, измеряющих смещение механических колебаний.

В последние 15—20 лет произошло быстрое развитие техники измерения и анализа механических колебаний (виброметрии) с тем, чтобы удовлетворить всем требованиям исследования и испытания новых, легких и быстродействующих машин и оборудования. Применение пьезоэлектрических акселерометров, преобразующих механические колебания в электрические сигналы, раскрыло новые возможности точного измерения и анализа механических колебаний электронными измерительными приборами.

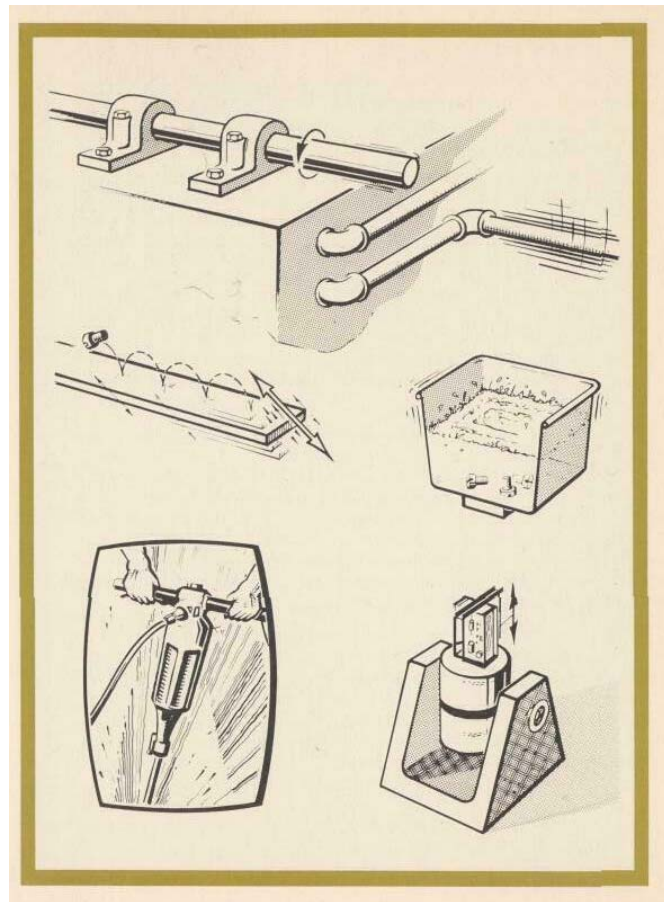


Источники механических колебаний

Избежать механических колебаний на практике почти нельзя, так как они обусловлены динамическими явлениями, сопровождающими присутствие допусков, зазоров и поверхностных контактов отдельных деталей машин и механизмов и сил, возникающих при вращении и возвратно-поступательном движении неуравновешенных элементов и деталей. Даже механические колебания с малой амплитудой часто вызывают резонансные колебания других элементов конструкций, усиливаются и становятся важным источником вибрации и шума.

Однако, механические колебания могут также быть полезным помощником человека. На применении искусственно генерируемых механических колебаний основываются, например, вибрационные питательные устройства, уплотнители для бетона, ультразвуковые ванны для очистки деталей, пневматические дрели и другие инструменты. Вибростенды, вибраторы и другие возбудители механических колебаний находят широкое применение при исследованиях и испытаниях изделий, узлов и деталей, подвергаемых воздействию точно определенных механических колебаний с целью измерения и анализа их физической и эксплуатационной характеристики и оценки их стойкости в отношении влияний механических колебаний и ударов.

Основным предположением успеха какой-либо работы, относящейся к механическим колебаниям, т. е. работы, целью которой является разработка машин и механизмов или эксплуатация и обслуживание находящегося на ходу оборудования, является точное определение параметров этих механических колебаний путем их измерения и анализа.



Природа механических колебаний

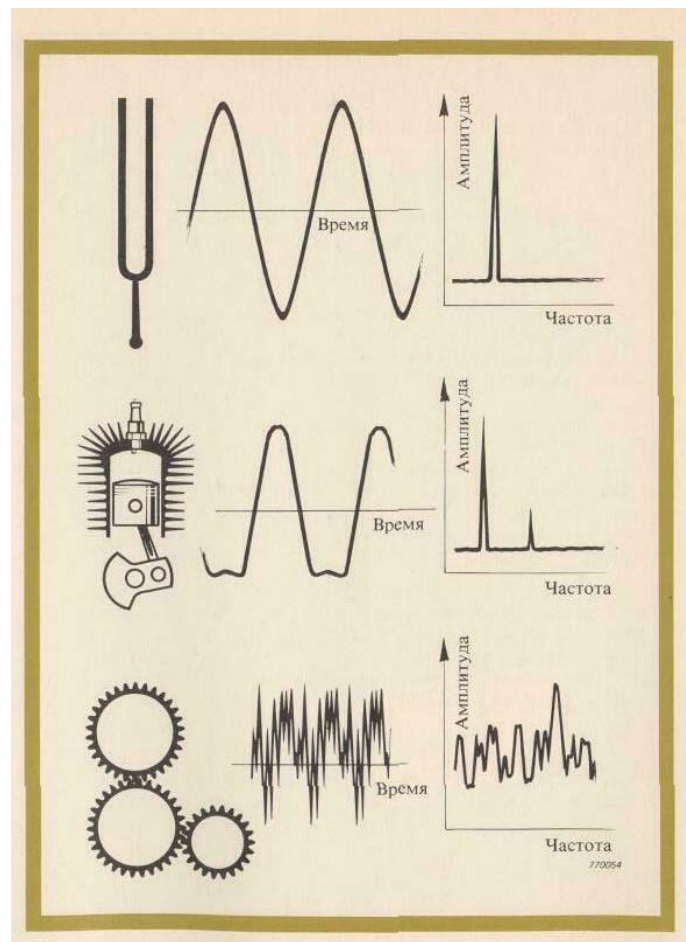
Тело считают вибрирующим, если оно совершает колебательное движение относительно опорного положения равновесия. Число полных циклов движения тела за единицу времени, т. е. за с, называется частотой и выражается в единицах Гц (герц).

Движение может быть простым и содержать лишь составляющую с одной частотой, например, движение камертона, или более сложным с несколькими составляющими, развивающимися одновременно на нескольких частотах. Примером здесь может служить движение поршня двигателя внутреннего сгорания.

Встречающиеся на практике вибрации обычно являются сложными механическими колебаниями с многими составляющими на разных частотах. Следовательно, на основе лишь амплитудно — временной диаграммы нельзя определить ни число, ни частоты отдельных составляющих сложного колебательного процесса.

Отдельные составляющие сложных механических колебаний можно обнаружить и определить путем исследования зависимости их амплитуд от частоты. Разложение механических колебаний в индивидуальные частотные составляющие называется частотным анализом. Частотный анализ является основным методом диагностики, основанием которой является исследование механических колебаний. График зависимости амплитуды от уровня определенной величины механических колебаний от частоты называется частотной спектрограммой.

Частотный анализ механических колебаний машин и механизмов нормально обнаруживает ряд выраженных частотных составляющих периодического характера, непосредственно связанных с основными движениями отдельных узлов и деталей исследуемой машины или механизма. Следовательно, частотный анализ дает возможность обнаружения отдельных источников механических колебаний.



Количественная оценка амплитуд механических колебаний

Для количественной оценки амплитуд механических колебаний, отображающей их опасность и строгость, можно использовать разные значения. На рисунке вправо показаны взаимные отношения двойной амплитуды, пикового значения, среднего значения и среднеквадратичного значения колебаний с синусоидальной формой волны.

Двойная амплитуда, отображающая полный размах колебаний, является важным параметром, например, в случаях когда смещение механических колебаний детали машины является критическим с точки зрения максимально допустимых механических напряжений и зазоров.

Пиковое значение эффективно именно при оценке кратковременных механических ударов и т. д. Однако, пиковое значение отображает только максимальное значение исследуемых колебаний, а не заключает в себе их временное развитие.

Среднее значение (усредненное или абсолютное) отображает временное развитие исследуемых колебаний, но его практическое применение ограничено ввиду того, что оно не имеет непосредственной связи ни с коей физической величиной этих колебаний.

Среднеквадратичное значение (СКЗ) является самым важным, так как в нем учитывается временное развитие исследуемых колебаний и оно непосредственно отображает значение, связанное с энергией и, следовательно, разрушающей способностью этих колебаний.

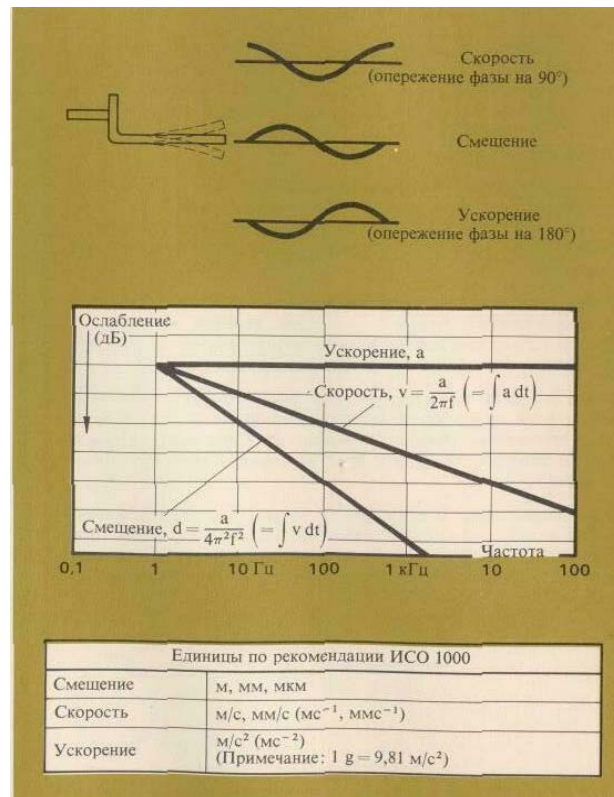


Параметры механических колебаний: ускорение, скорость и смещение и соответствующие единицы

При рассмотрении камертона можно амплитуду волны колебаний полагать равной физическому смещению концов его плеч относительно положения покоя. Однако, в основу описания движения камертона можно положить не только смещение, а также скорость или ускорение колебаний. Форма волны и период рассматриваемых колебаний идентичны для смещения, скорости и ускорения. Главное различие этих трех параметров заключается во взаимном фазовом сдвиге их кривых, отображающих зависимость амплитуды от времени (см. рис.).

Амплитуды смещения, скорости и ускорения колебаний с синусоидальной формой волны взаимно связаны математическими функциями частоты и времени, показанными на рисунке вправо. Пренебрегая фазовыми соотношениями, т. е. опираясь на результаты измерения и анализа с усреднением во времени, скорость механических колебаний можно определить путем деления их ускорения на пропорциональный частоте фактор, а смещение можно аналогично получить делением ускорения на фактор, пропорциональный возведенной в квадрат частоте. Описанные выше операции автоматически осуществляются электронными интеграторами, встроенными в современных виброизмерительных приборах.

Ускорение, скорость и смещение механических колебаний обычно выражаются в единицах международной системы единиц, соответствующих требованиям рекомендации ИСО 1000 и приведенных в таблице вправо. Ускорение механических колебаний также часто относится к ускорению силы тяжести (g), хотя эта единица и не входит в международную систему единиц согласно ИСО. К счастью, единицы g и m/s^2 взаимно связаны фактором $\text{прибл. } 10 \text{ (9,81)}$, так что производимое в уме преобразование с точностью до 2 % совсем просто и быстро.



Условия выбора одного из параметров механических колебаний

Применение вибродатчика, чувствительного к ускорению, дает возможность измерения и анализа не только ускорения, а также скорости и смещения механических колебаний. Нужное преобразование ускорения в скорость и смещение обеспечивают электронные интеграторы, которыми снабжено большинство современных виброизмерительных приборов.

При одноразовом измерении механических колебаний с широкой частотной полосой играет важную роль определяемый параметр, в частности тогда, когда подлежащий измерению процесс содержит много составляющих с разными частотами. Измерение смещения приводит к подчеркиванию составляющих с низкими частотами, в то время как измерение ускорения результирует в подчеркивании значения высокочастотных составляющих.

Опыт подтверждено, что общее среднеквадратичное значение скорости, измеряемое в частотном диапазоне от 10 до 1000 Гц, наиболее точно отображает строгость и опасность механических колебаний. Возможным объяснением этого эмпирического правила является соответствие определенного уровня скорости определенному уровню энергии, так что низкочастотные и высокочастотные составляющие исследуемого процесса имеют с точки зрения энергии колебаний идентичные значения (вес). Отметим, что большинство встречающихся на практике машин генерирует механические колебания с плоским и почти линейным частотным спектром скорости.

При узкополосном частотном анализе проявляется применение того или иного параметра только наклоном строящейся на бумаге регистрирующего прибора спектрограммы (см. график в

центре предыдущей страницы). Следовательно, можно вывести практическое правило: всегда предпочтительно применять тот параметр механических колебаний, частотный спектр которого имеет вид плоской кривой. Это автоматически обеспечивает оптимальную эксплуатацию виброизмерительной аппаратуры, в частности с точки зрения ее рабочего динамического диапазона, т. е. диапазона с пределами, равными наибольшему и наименьшему значениям, надежно и точно измеряемым данной аппаратурой. В соответствии с этим правилом предпочтение при частотном анализе обычно отдается ускорению или скорости механических колебаний.

Так как измерение ускорения сопровождается подчеркиванием высокочастотных составляющих исследуемого процесса, ускорению механических колебаний отдается предпочтение при измерении и анализе в диапазоне, перекрывающем область высоких частот.

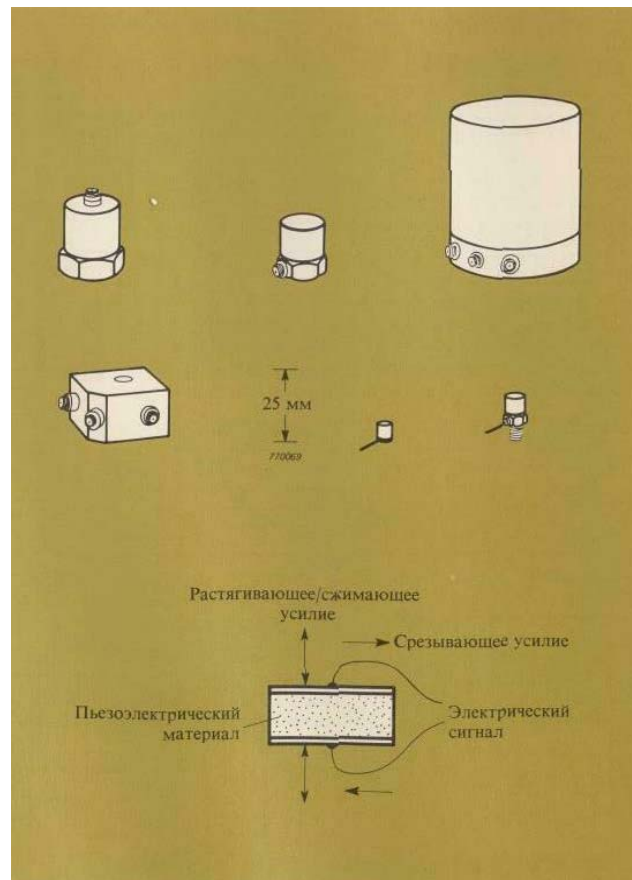
К характерным свойствам механических систем относится то, что заметные смещения происходят только медленно, т. е. их составляющие находятся только в области низких частот. Следовательно, измерение и анализ смещения не являются задачами первостепенной важности при общем исследовании механических колебаний. Однако, смещение играет важную роль у машин и механизмов, сконструированных с учетом малых зазоров между отдельными элементами и деталями. Смещение также часто служит параметром при балансировке вращающихся элементов, так как относительно большие смещения наблюдаются на частоте вращения балансируемой детали. Отметим, что эта частота является наиболее важной при балансировке.

Пьезоэлектрический акселерометр

Пьезоэлектрический акселерометр является универсальным вибродатчиком, в настоящее время применяемым почти во всех областях измерения и анализа механических колебаний. Эксплуатационная характеристика пьезоэлектрических акселерометров в общем лучше характеристики любого другого вибродатчика. Пьезоэлектрические акселерометры отличаются широкими рабочими частотным и динамическим диапазонами, линейными характеристиками в этих широких диапазонах, прочной конструкцией, надежностью и долговременной стабильностью параметров.

Так как пьезоэлектрические акселерометры являются активными датчиками, генерирующими пропорциональный механическим колебаниям электрический сигнал, при их эксплуатации не нужен источник питания. Отсутствие движущихся элементов конструкции исключает возможность износа и гарантирует исключительную долговечность пьезоэлектрических акселерометров. Отметим, что отдаваемый акселерометром сигнал, пропорциональный ускорению, можно интегрировать с целью измерения и анализа скорости и смещения механических колебаний.

Основным элементом пьезоэлектрического акселерометра является диск из пьезоэлектрического материала, в качестве которого нормально используется искусственно поляризованная ферроэлектрическая керамика. Подвергаемый действию силы (при растяжении, сжатии или сдвиге) пьезоэлектрический материал генерирует на своих поверхностях, к которым прикреплены электроды, электрический заряд, пропорциональный воздействующей силе.



Конструкция акселерометров

Пьезоэлемент практических пьезоэлектрических акселерометров сконструирован так, что при возбуждении механическими колебаниями предусмотренная в корпусе акселерометра масса воздействует на него силой, пропорциональной ускорению механических колебаний. Это соответствует закону, согласно которому сила равна произведению массы и ускорения.

На частотах значительно меньших резонансной частоты общей системы масса — пружина ускорение массы акселерометра идентично ускорению его основания и, следовательно, отдаваемый акселерометром электрический сигнал пропорционален ускорению воздействующих на него механических колебаний.

Основные варианты конструкции практических пьезоэлектрических акселерометров следующие:

Вариант сжатия, в котором масса воздействует силой сжатия на пьезоэлектрический элемент и

Вариант сдвига, характерным для которого является работа пьезоэлемента под действием срезающего усилия, обусловливаемого внутренней массой акселерометра.



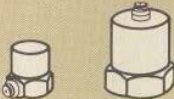
Типы акселерометров

Большинство изготовителей вибродатчиков изготавливает и выпускает богатый ассортимент акселерометров — на первый взгляд слишком много моделей, так что подбор соответствующего условиям измерения акселерометра является затруднительным. Небольшая группа акселерометров «общего назначения» удовлетворяет требованиям большинства нормальных областей измерения и анализа механических колебаний. Разъемы для подключения соединительных кабелей этих акселерометров расположены или сверху, или сбоку корпуса и их чувствительности находятся в диапазоне 1—10 мВ или пКл на м/с^2 . Специальные акселерометры фирмы Брюль и Кьер (Uni-Gain®) имеют нормализованную чувствительность, например 1 или 10 пКл/ мс^{-2} , что значительно упрощает калибровку и проверку виброизмерительных систем.

Другие акселерометры разработаны с учетом достижения оптимальных характеристик в определенных областях применения. Примером могут служить малогабаритные и легкие акселерометры, предназначенные для измерения механических колебаний с большими амплитудами и высокими частотами и применяемые при исследовании легких конструкций, каркасов, панелей и т. д. Собственная масса этих акселерометров находится в пределах от 1/2 до 2 г.

Специальные акселерометры являются оптимальными, например, для одновременного измерения в трех взаимно перпендикулярных направлениях, работы при высоких температурах, измерения больших ускорений или сильных механических ударов, калибровки вибродатчиков методом сравнения и для непрерывного контроля механических колебаний в промышленности и т. д.

Акселерометры общего назначения



Чувствительность: 1—10 пКл/ мс^{-2}
 Вес: 1—50 г
 Частотный диапазон: 0—12 000 Гц

Миниатюрные акселерометры



Чувствительность: 0,05—0,3 пКл/ мс^{-2}
 Вес: 0,4—2 г
 Частотный диапазон: 1—25 000 Гц

Специальные акселерометры



- для измерения в трех взаимно перпендикулярных направлениях
- для стационарных виброконтрольных установок
- для измерения колебаний конструкций, зданий, мостов и др.
- для эксплуатации при высоких температурах
- для калибровки и проверки вибродатчиков
- для измерения и анализа механических ударов с амплитудами до 100 км/ с^2 (100 000 g)





Характеристики акселерометров (чувствительность, масса и динамический диапазон)

Основным параметром акселерометра нормально считается чувствительность. Идеальным являлся бы акселерометр, отдающий электрический сигнал с возможно большой амплитудой. Однако, уже на данном месте необходимо идти на компромисс, так как с большей чувствительностью нормально связана необходимость в относительно размерном пьезоэлементе и, следовательно, в увеличении размеров и собственной массы акселерометра.

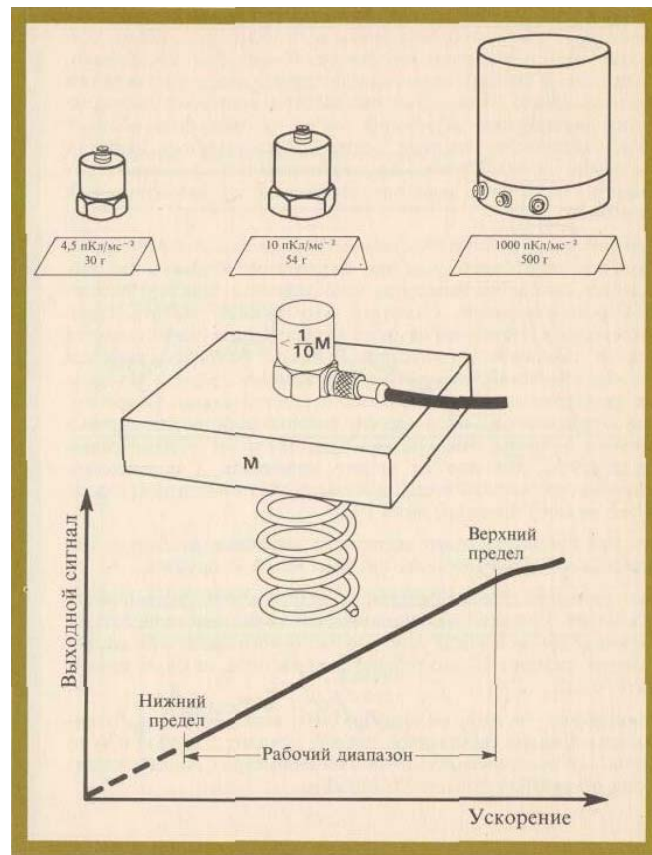
В нормальных областях применения чувствительность акселерометра не является критическим параметром, так как современные предусилители рассчитаны на усиление сигналов с малыми амплитудам и.

Собственная масса акселерометра становится важным параметром при измерении и анализе механических колебаний легких объектов. Образованная акселерометром дополнительная масса может значительно влиять на амплитуду и частоту измеряемых и анализируемых колебаний.

За общее правило можно взять, что собственная масса акселерометра не должна превышать одну десятую динамической массы объекта, на котором он закреплен.

Рабочий динамический диапазон акселерометра необходимо учитывать при измерении и анализе механических колебаний с очень малыми или очень большими амплитудами ускорения. Показанный на рисунке нижний предел рабочего динамического диапазона нормально не определяется непосредственно акселерометром, а скорее воспринимаемым и генерируемым соединительными кабелями и усилительными каскадами электрическим шумом. При применении виброизмерительной аппаратуры общего назначения этот нижний предел нормально порядка $1/100 \text{ м/с}^2$.

Верхний предел рабочего динамического диапазона акселерометра определяется прочностью его конструкции. Характеристика типичного акселерометра общего назначения линейна до $50000\text{--}100000 \text{ м/с}^2$, т. е. до области амплитуд механических ударов. Специальные акселерометры, предназначенные для измерения и анализа механических ударов, линейны до 1000 км/с^2 ($100\,000 \text{ g}$).



Рабочий частотный диапазон акселерометров

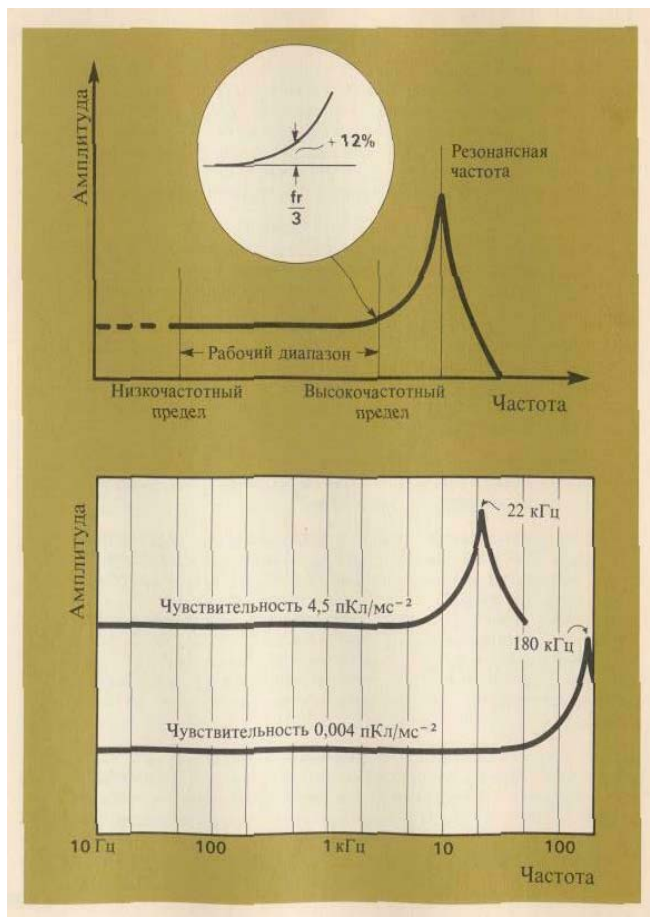
Энергия механических колебаний, генерируемых механическими системами, обычно сосредоточена в относительно узком диапазоне частот, простирающемся от 10 до 1000 Гц. Однако, измерению и анализу нормально подлежит диапазон с верхним пределом около 10 кГц, так как частоты некоторых составляющих механических колебаний могут находиться в области более высоких и высоких частот. Следовательно, рабочий частотный диапазон используемого акселерометра должен перекрывать частотный диапазон измеряемых и анализируемых колебаний.

Нижний предел рабочего частотного диапазона акселерометра на практике определяется двумя факторами. Первым из них является нижняя частота среза используемого вместе с акселерометром усилителя. Отметим, что нижняя частота среза современных усилителей намного меньше 1 Гц и она не является важной причиной затруднений. Вторым фактором является влияние изменений температуры окружающей среды, к которым все акселерометры более или менее чувствительны. Современные акселерометры, пьезоэлемент которых работает под срезающим усилием, минимально чувствительны к изменениям температуры, так что их можно применять в нормальных условиях окружающей среды при измерениях в частотном диапазоне с нижним пределом ниже 1 Гц.

Верхний предел рабочего частотного диапазона акселерометра определяется резонансом его системы масса — пружина.

Эмпирическим правилом можно принять, что погрешность измерения составляющих механических колебаний с частотами вблизи верхнего предела рабочего частотного диапазона акселерометра, равного $1/3$ его резонансной частоты, не будет превышать +12%.

Резонансная частота малогабаритных акселерометров, отличающихся малой собственной массой, доходит до 180 кГц, в то время как резонансная частота акселерометров общего назначения находится в области 20—30 кГц.



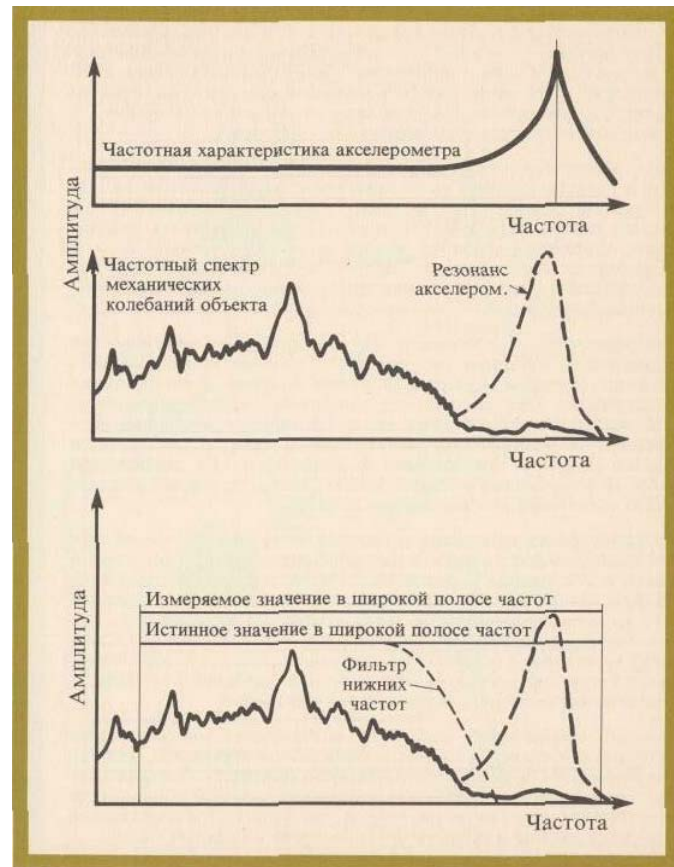
Элиминация ошибок, обусловленных резонансом акселерометра

Ввиду увеличения чувствительности акселерометра в области резонанса отдаваемый им электрический сигнал не будет точно пропорционален ускорению механических колебаний исследуемого объекта. Это действительно в области, перекрывающей частоту его собственного резонанса.

Частотный анализ механических колебаний дает возможность обнаружения высокочастотного пика, обусловленного резонансом акселерометра. Следовательно, обнаруженный резонансный пик можно элиминировать в ходе анализа. Дело совсем другое при широкополосном измерении механических колебаний, так как включение резонансного пика в рабочую частотную полосу виброизмерительной аппаратуры приводит к ошибочным результатам, в частности в случае, если измеряемый процесс содержит составляющие с частотами в области резонанса акселерометра.

Решением этой проблемы является применение акселерометра с широким рабочим частотным диапазоном и фильтра нижних частот, эффективно подавляющего обусловленные резонансом акселерометра составляющие. Отметим, что большинство современных виброметров и преусилителей для виродатчиков снабжено фильтрами нижних частот.

При работе в области низких частот можно нежелательное влияние высокочастотных колебаний резонанса акселерометра устранить при помощи механических фильтров. Механические фильтры состоят из упругого материала, например резины, закрепленного между двумя монтажными пластинками. Эти фильтры устанавливаются между поверхностью исследуемого или испытываемого объекта и основанием акселерометра с целью уменьшения верхнего предела рабочего частотного диапазона системы до полосы 0,5—5 кГц.



Определение места крепления и положения акселерометра

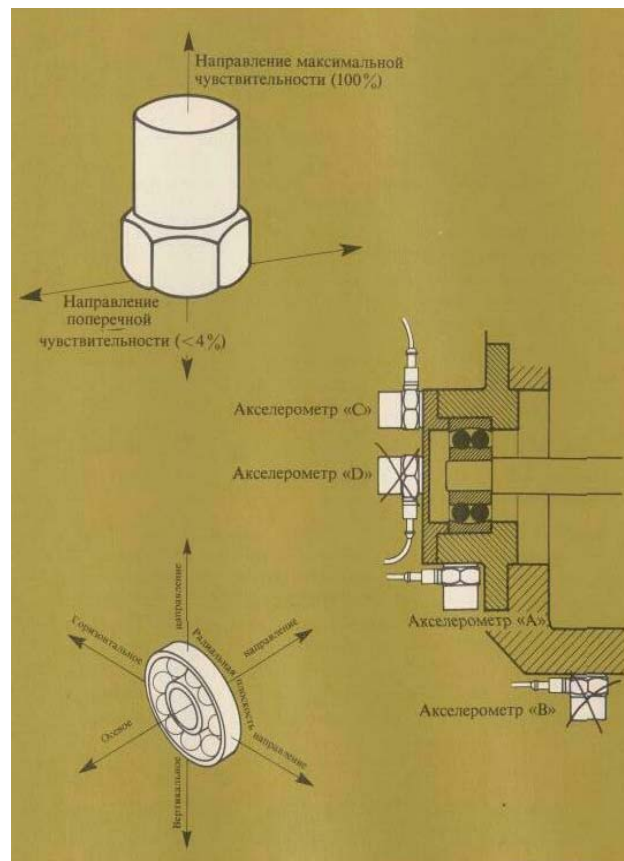
Акселерометр следует закреплять так, чтобы его ось максимальной чувствительности совпадала с нужным при измерении направлением. Отметим, что акселерометры также чувствительны к колебаниям в поперечных направлениях. Однако, этой поперечной чувствительностью можно в большинстве практических случаев пренебречь, так как она нормально меньше 1 % максимальной чувствительности акселерометра.

Цель измерения и анализа механических колебаний обычно диктует расположение мест крепления акселерометра на исследуемом объекте. Рассмотрим, например, показанный на рисунке вправо корпус подшипника. Целью Измерения механических колебаний является контроль условий работы вала и подшипника. Акселерометр следует установить так, чтобы на его основание непосредственно действовали механические колебания подшипника.

Следовательно, акселерометр «А» воспринимает механические колебания подшипника без заметного влияния колебаний, создаваемых другими узлами и деталями машины, в то время как акселерометр «В» наверно воспринимает модифицированные механическими параметрами места соединения колебания подшипника и механические колебания, генерируемые другими узлами машины. Аналогично, акселерометр «С» расположен более целесообразно с точки зрения распространения механических колебаний чем акселерометр «D».

При подготовке измерения и анализа механических колебаний всегда поднимается вопрос о направлении, оптимальном с точки зрения исследования определенного элемента или узла машины. Общего ответа на этот вопрос или соответствующего правила нет, но в рассматриваемом выше примере можно считать эффективным, в частности для контроля условий работы, измерение колебаний в осевом и одном из радиальных направлений. Предпочтение отдается радиальному направлению, соответствующему направлению минимальной жесткости.

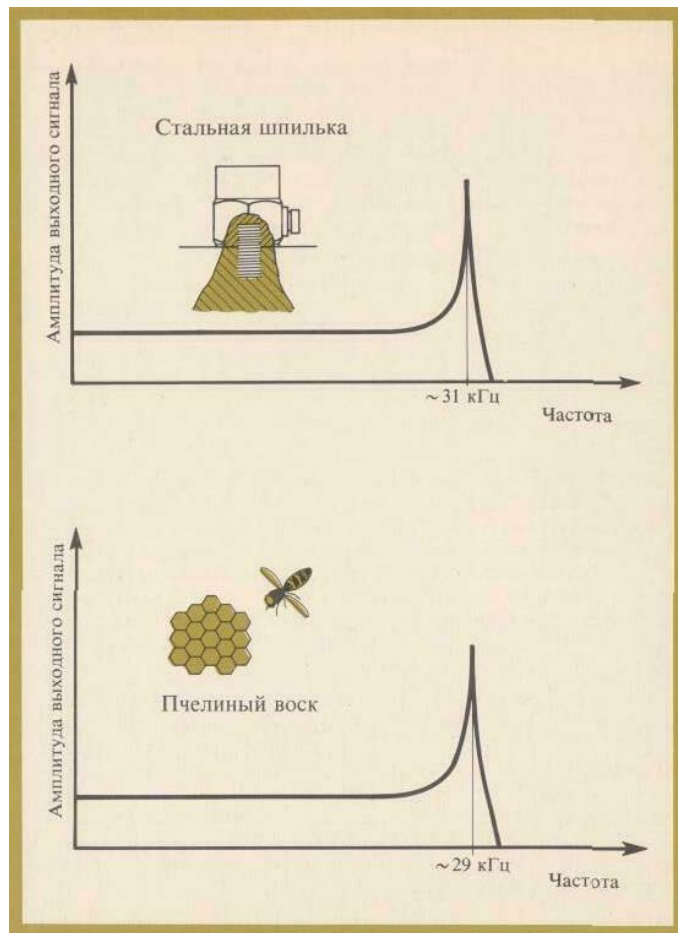
Реакция механических систем на возбуждение механическими колебаниями является сложным физическим процессом, так что при измерении даже на одном элементе машины и близких друг другу точках могут наблюдаться большие различия в амплитуде и частотном спектре исследуемых колебаний. Вышесказанное относится именно к области более высоких и высоких частот.



Крепление акселерометров

Крепление акселерометра, в частности его надежность, на поверхности исследуемого или испытываемого объекта является одним из самых важных условий достижения точных и надежных результатов в виброизмерительной практике. Ненадежное крепление акселерометра влечет за собой уменьшение его резонансной частоты после крепления и, следовательно, значительно уменьшает его рабочий частотный диапазон. Идеальным является крепление акселерометра на гладкой плоской поверхности прочной стальной резьбовой шпилькой (см. рисунок). Тонкий слой консистентной смазки на поверхности в месте крепления обычно увеличивает общую жесткость механического соединения акселерометра и объекта. Глубина резьбового отверстия должна быть достаточной с тем, чтобы шпилька не упиралась до дна отверстия в основании акселерометра. График в верхней части рисунка показывает частотную характеристику акселерометра общего назначения, закрепленного стальной шпилькой на гладкой поверхности объекта. Резонансная частота закрепленного акселерометра почти равна резонансной частоте при заводской калибровке (прибл. 32 кГц), в ходе которой акселерометр закреплен на совершенно гладкой и плоской поверхности.

Часто используемым альтернативным методом крепления акселерометров является крепление на тонком слое пчелиного воска. Приведенная в нижней части рисунка частотная характеристика показывает высокое качество этого метода крепления, гарантирующего только незначительное уменьшение резонансной частоты акселерометра (прибл. 29 кГц). Отметим, что пчелиный воск размягчается с ростом температуры, так что его можно применять в температурном диапазоне до 40°C. Крепление акселерометра пчелиным воском на гладкой чистой поверхности можно считать надежным до ускорений с амплитудами около 100 м/с².



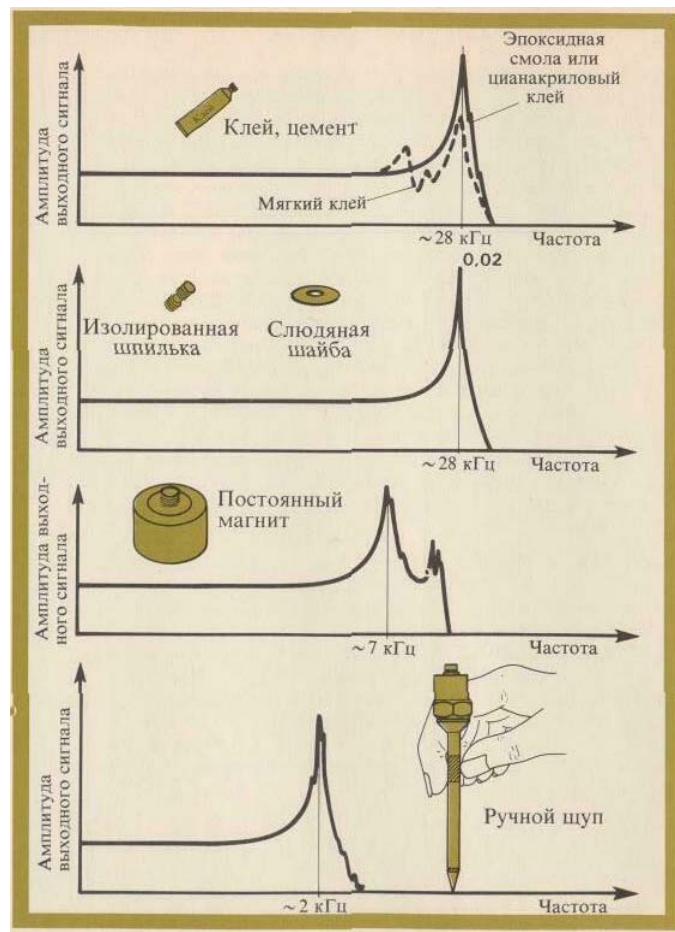
Крепление акселерометров

В тех случаях, когда нужно прочное крепление одного или нескольких акселерометров и нарушение поверхности объекта резьбовыми отверстиями невозможно или нежелательно, эффективными являются специальные шпильки, прикрепляемые к объекту твердым клеем или цементом. В качестве склеивающих материалов рекомендуются эпоксидные смолы и цианакриловые клеи. Применение мягких клеев может привести к значительному уменьшению рабочего частотного диапазона акселерометра.

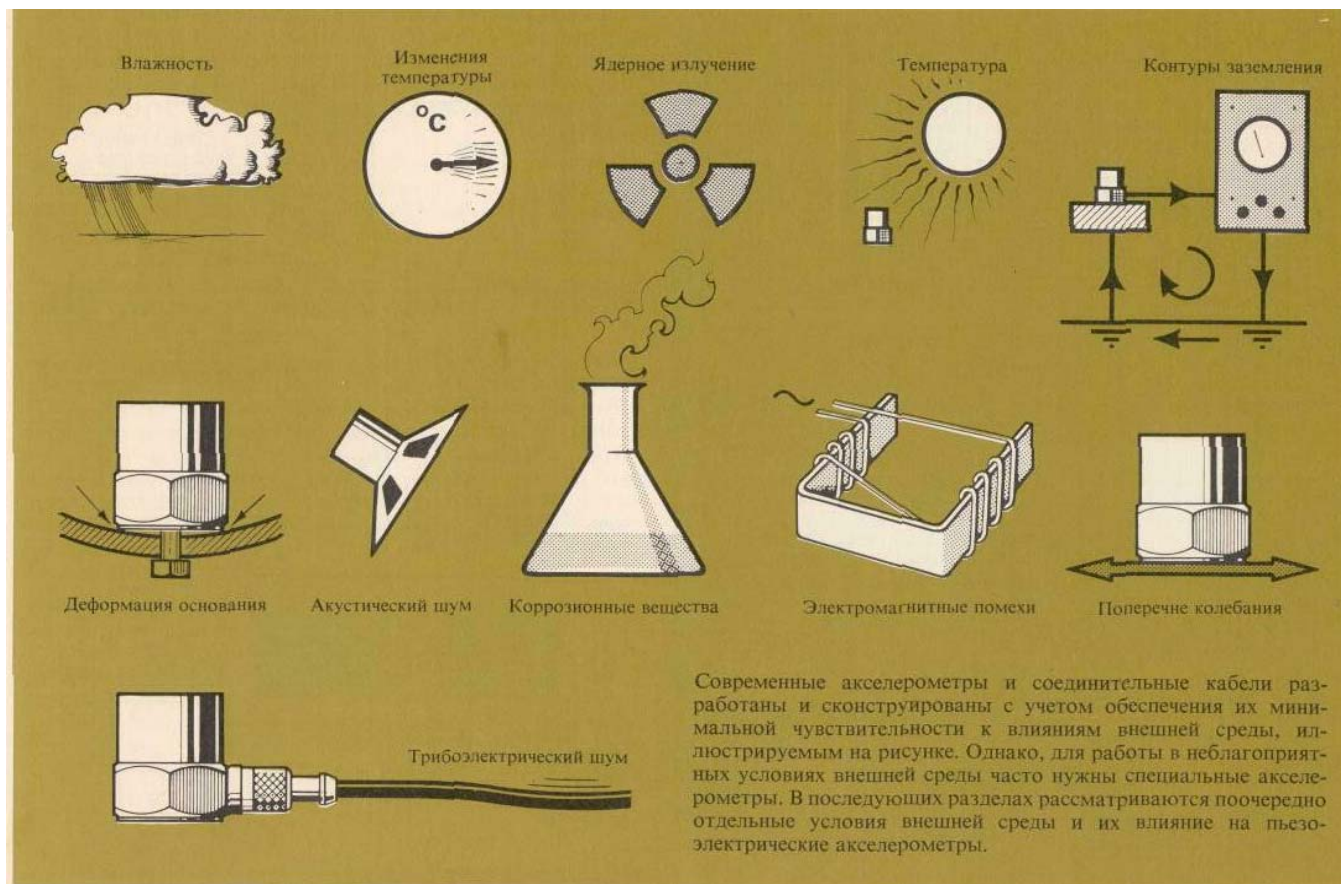
Изолированная шпилька и слюдяная шайба используются там, где нужна электрическая изоляция акселерометра относительно объекта. Электрическая изоляция предотвращает образование контуров заземления, рассматриваемых более подробно в разделе «Влияния условий внешней среды». Отметим, что слюдяная шайба должна иметь малую толщину. Изолированная шпилька и слюдяная шайба обеспечивают надежное крепление акселерометра, уменьшающее резонансную частоту всего до 28 кГц.

Простым методом крепления акселерометра на ровной поверхности объекта из магнитного материала является применение постоянного магнита. Так как резонансная частота закрепленного на магните акселерометра значительно уменьшается (прибл. до 7 кГц), этим методом можно пользоваться только при измерении и анализе в области низких частот, т. е. до 2 кГц. Сила постоянного магнита обеспечивает надежную работу акселерометра при ускорениях до 1000—2000 м/с² (в зависимости от собственной массы акселерометра).

Поддерживаемый и перемещаемый рукой шуп, на верхнем конце которого закреплен акселерометр, удобно применять при быстром ориентировочном измерении и проверке механических колебаний. Однако, ввиду малой общей жесткости, получаемые при применении этого метода результаты не совсем точны и воспроизводимы. Виброизмерительная система, используемая вместе с закрепленным на шупе акселерометром, должна содержать фильтр нижних частот, ограничивающий общий рабочий частотный диапазон на частоте прибл. 1000 Гц.



Влияния условий внешней среды — общие сведения



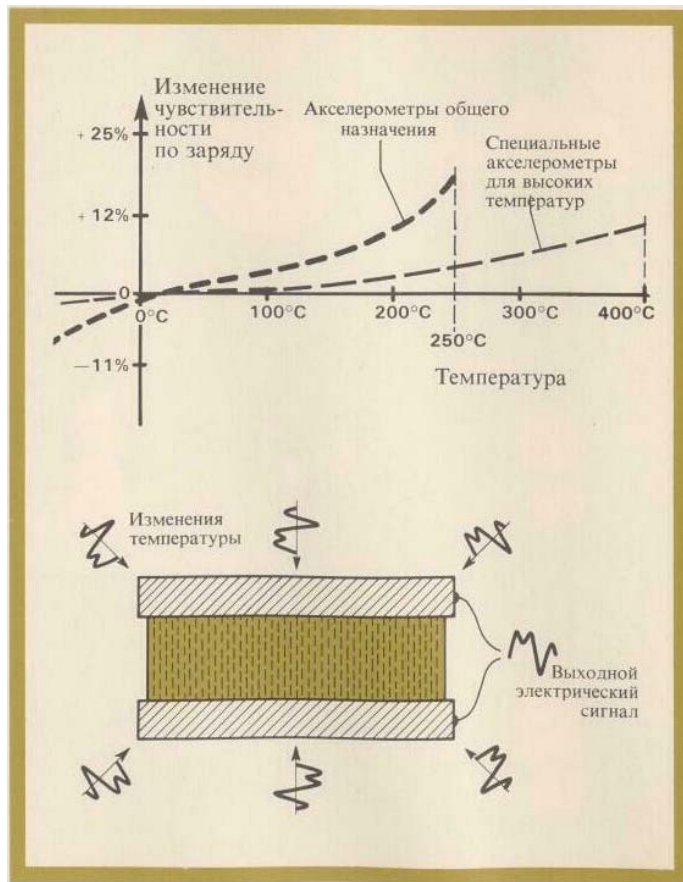
Влияния условий внешней среды — температура

Нормальные акселерометры общего назначения могут работать в температурном диапазоне с верхним пределом 250°C . При превышении этого предела начинается процесс деполяризации пьезокерамики и, следовательно, необратимого изменения чувствительности акселерометра. Отметим, что акселерометр с частично деполяризованным пьезоэлементом не теряет работоспособности, но его необходимо повторно калибровать. Для эксплуатации в температурном диапазоне до 400°C предусмотрены акселерометры, чувствительный элемент которых изготовлен из специальной пьезокерамики.

Так как свойства всех пьезоэлектрических материалов зависят от температуры, результатом изменений температуры внешней среды являются изменения чувствительности работающего в таких условиях акселерометра. Чтобы дать возможность внесения соответствующей поправки, все акселерометры фирмы Брюль и Кьер снабжаются индивидуальной калибровочной картой-паспортом, в которой также приводится зависимость чувствительности от температуры. Внесение поправки на температуру внешней среды нужно именно при эксплуатации акселерометров при температурах намного больше или меньше 20°C .

Подвергаемые небольшим быстрым изменениям температуры акселерометры отдают паразитный электрический сигнал, ничем не связанный с измеряемыми механическими колебаниями. Так как амплитуда этого сигнала слишком мала, он является серьезным только при измерении и анализе механических колебаний с малыми ускорениями и/или низкими частотами. Современные акселерометры, в частности акселерометры с подвергаемым срезающему усилию пьезоэлементом, отличаются малой чувствительностью к быстрым изменениям температуры внешней среды.

При креплении акселерометра на поверхностях, температура которых превышает 250°C , рекомендуется применение теплоотвода и слюдяной прокладки, устанавливаемых между основанием акселерометра и поверхностью исследуемого или испытываемого объекта. При таком креплении температура основания акселерометра не превысит 250°C даже при температурах поверхности объекта в диапазоне $350\text{—}400^{\circ}\text{C}$. Еще более эффективным является форсированное воздушное охлаждение основания акселерометра.



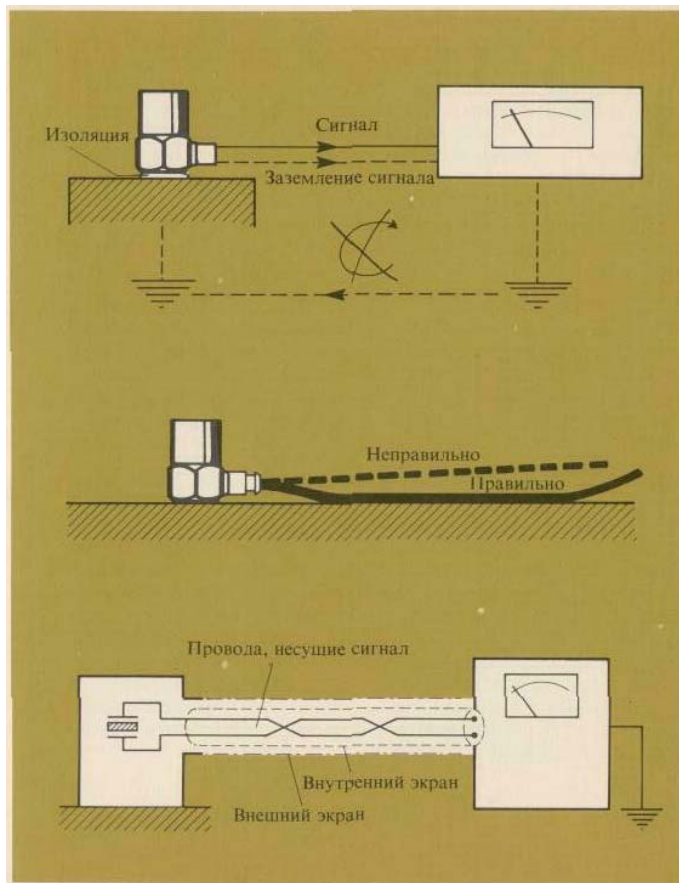
Влияния условий внешней среды — шум соединительных кабелей

Поскольку пьезоэлектрические акселерометры являются высокоимпедансными вибродатчиками, шум используемых вместе с ними соединительных кабелей может быть причиной серьезных затруднений. Источниками таких помех могут быть контуры заземления, трибоэлектрический шум и помехи электромагнитного происхождения.

Контур заземления, образуемые при заземлении акселерометра и измерительной аппаратуры на разные точки, способствуют прохождению паразитных токов через экраны соединительных кабелей и являются серьезным источником шума и помех. Эффективным методом устранения этих контуров является электрическая изоляция акселерометра, обеспечиваемая изолированной шпилькой и слюдяной шайбой (см. раздел «Крепление акселерометров»).

Трибоэлектрический шум возникает при механическом движении соединительных кабелей. Непосредственной причиной этого шума являются местные изменения емкости и заряда, вызываемые динамическими изгибом, растяжением и сжатием отдельных элементов соединительного кабеля. Хотя трибоэлектрический шум соединительных кабелей фирмы Брюль и Кьер сведен до минимума путем применения специального графитового промежуточного слоя, кабели всегда целесообразно прочно и надежно закреплять липкой лентой или клеем на возможно малом расстоянии от акселерометров.

Электромагнитный шум является шумом, воспринимаемым соединительными кабелями в присутствии сильных электромагнитных полей, например, вблизи работающих электродвигателей, машин и т. д. Минимально чувствительными к шумам электромагнитного происхождения являются соединительные кабели с двойным экраном. Однако, в критических условиях может оказаться неизбежным применение акселерометра с симметричным выходом и дифференциального предусилителя.

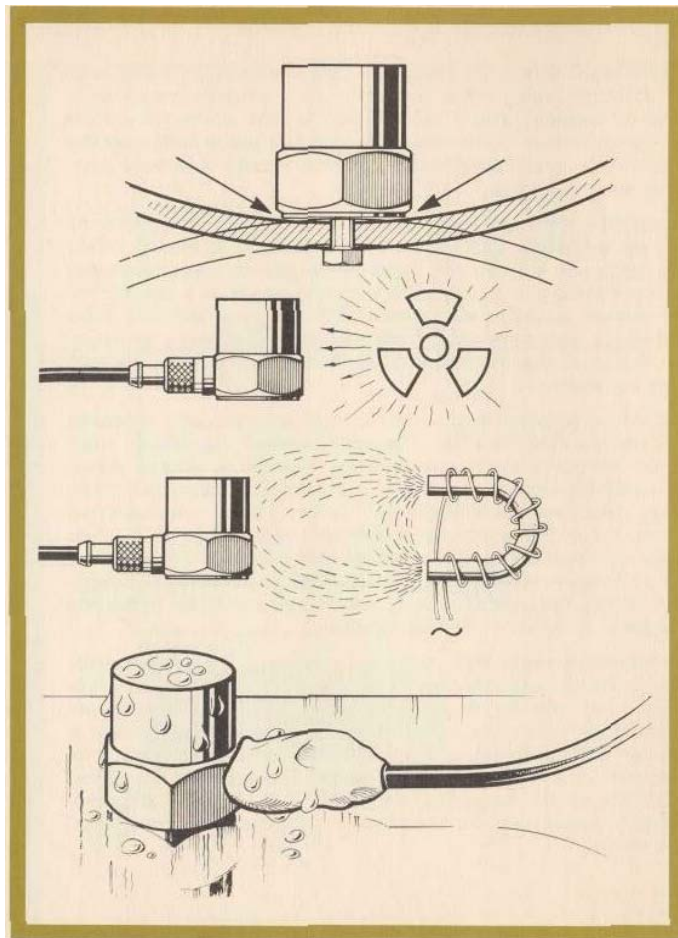


Другие влияния условий внешней среды

Деформация основания: Результатом деформации основания акселерометра, закрепленного на деформирующейся поверхности подвергаемого нагрузке объекта, является паразитный электрический сигнал, ничем не связанный с измеряемыми и анализируемыми механическими колебаниями. Именно с целью уменьшения этого эффекта акселерометры снабжаются толстым и прочным основанием. Отметим, что новые акселерометры фирмы Брюль и Кьер, имеющие три подвергаемых срезающему усилию пьезоэлемента (Delta Shear®), почти нечувствительны к деформации основания, так как их сложный пьезоэлемент закреплен на треугольной стойке в центре, а не на основании.

Ядерное излучение: Большинство изготавливаемых и выпускаемых фирмой Брюль и Кьер акселерометров может работать надежно и без заметного изменения параметров в условиях сильного ядерного излучения, т. е. при дозе гамма-излучения до 10 кр/ч и накопленной дозе до 2 Мрад. Предусмотрены также специальные акселерометры, рассчитанные на эксплуатацию при излучении, накопленная доза которого превышает 100 Мрад.

Влажность: Корпуса акселерометров фирмы Брюль и Кьер или уплотнены эпоксидными смолами, или заварены с целью обеспечения точности, надежности и стабильности даже в условиях большой относительной влажности внешней среды. При кратковременной эксплуатации в жидкостях и очень влажных средах рекомендуется применение уплотненных соединительных кабелей с тефлоновой изоляцией. Отметим, что место соединения акселерометра и кабеля также нужно уплотнять. Для этой цели подходят неокисляемая силиконовая резина, вулканизирующая при комнатной температуре, и разные мастики. В стационарных установках, работающих во влажной среде, следует применять акселерометры промышленного типа, снабженные интегральными соединительными кабелями.

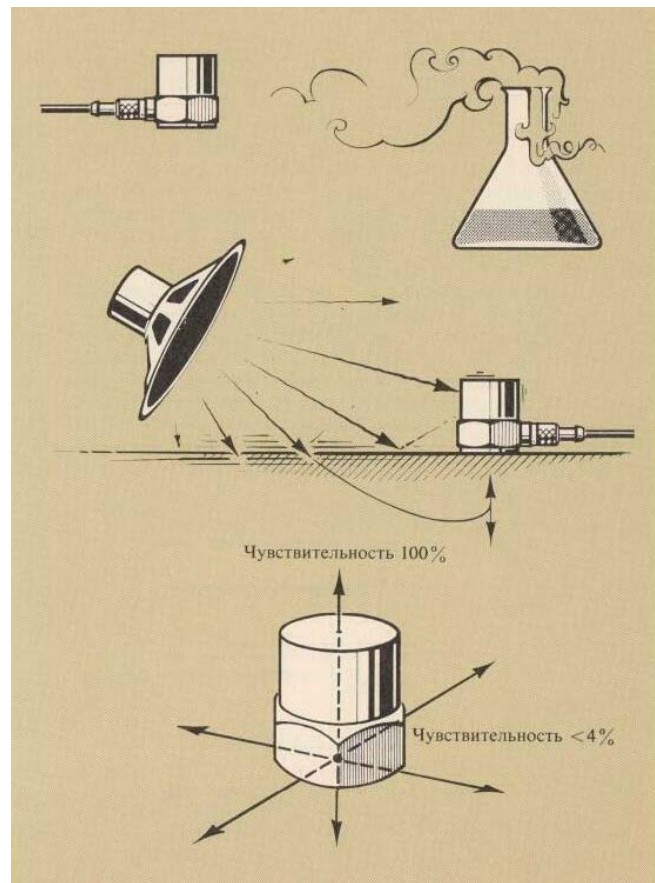


Другие влияния условий внешней среды

Коррозионные вещества: Все материалы, используемые в конструкции акселерометров фирмы Брюль и Кьер, отличаются исключительной коррозионной стойкостью и сопротивлением всем встречающимся в промышленности химическим коррозионным веществам.

Акустические шумы: Акустические шумы, генерируемые нормальными машинами и оборудованием, имеют лишь незначительное влияние на точность результатов измерения и анализа механических колебаний. В общем, возбуждаемая акустическим шумом вибрация механических конструкций и их элементов нормально намного превышает влияние распространяющегося в воздухе и воздействующего непосредственно на акселерометр акустического шума.

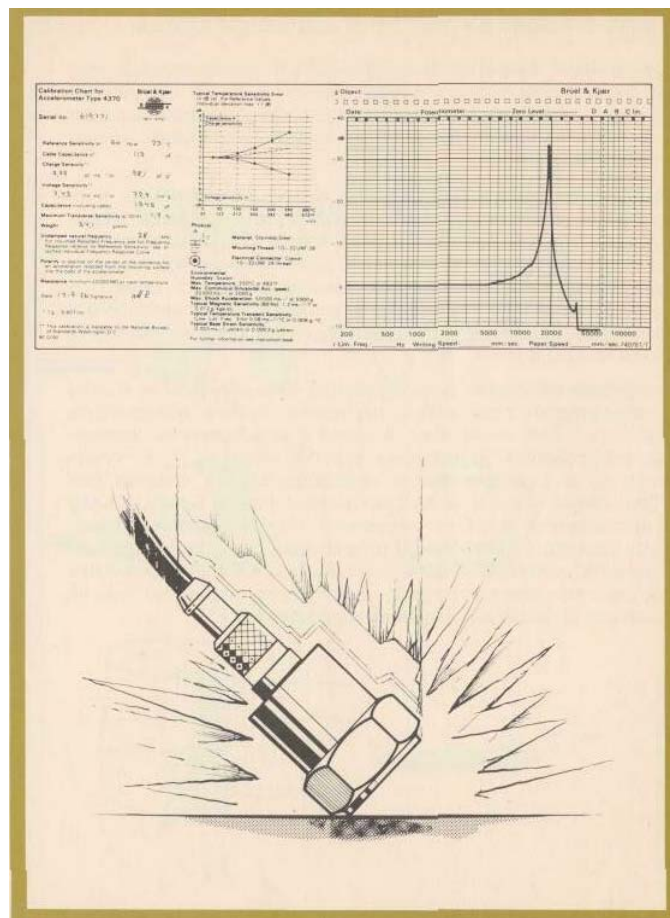
Поперечные колебания: Акселерометры чувствительны не только к механическим колебаниям, перпендикулярным поверхности, на которой они закреплены, а также к колебаниям в поперечных направлениях. Поперечная чувствительность, т. е. чувствительность к колебаниям в перпендикулярной главной оси вибродатчика плоскости, акселерометров фирмы Брюль и Кьер не превышает 3—4 % (тип. значение < 1 %) их чувствительности в направлении главной оси. В присутствии сильных поперечных колебаний необходимо также учитывать поперечную резонансную частоту акселерометров, достигающую прилб. до 1/3 их резонансной частоты в направлении главной оси.



Калибровка акселерометров

Все акселерометры фирмы Брюль и Кьер подвергаются в процессе производства тщательной заводской калибровке и поставляются вместе с соответствующими индивидуальными калибровочными картами-паспортами. Параметры акселерометров, при эксплуатации и хранении которых соблюдаются определяемые технической спецификацией пределы температуры, излучения, механических ударов и т. д., стабильны в течение длительного времени. На основе опыта установлено, что параметры акселерометров не изменяются более чем на 2% даже в течение нескольких лет.

Однако, небрежное обращение с акселерометрами даже при их нормальной эксплуатации может привести к значительным изменениям их параметров и в крайних случаях даже к их повреждению. Отметим, что результатом свободного падения акселерометра из руки на пол из бетона является механический удар с ускорением, достигающим до нескольких тысяч g. Следовательно, акселерометры рекомендуется проверять и повторно калибровать по регулярным интервалам времени. Калибровка чувствительности акселерометра нормально также дает гарантию его работоспособности.

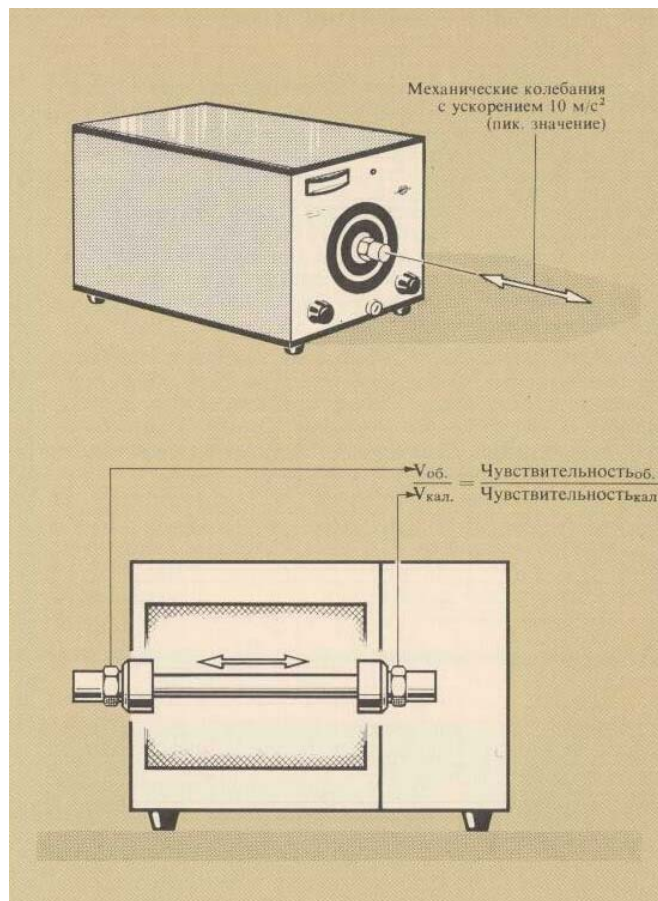


Простой калибратор

При периодической проверке и повторной калибровке акселерометров удобно и эффективно применять выпускаемый фирмой Брюль и Кьер калибровочный источник механических колебаний, работающий от внутренних батарей. Этот портативный калибратор имеет собственный вибростол, амплитуду ускорения которого можно регулировать точно на 10 м/с^2 .

Калибруемый акселерометр закрепляется на вибростоле и возбуждается механическими колебаниями с ускорением 10 м/с^2 . Генерируемый акселерометром электрический сигнал измеряется соответствующей аппаратурой. Чувствительность калибруемого акселерометра можно также определять на основе сравнения с чувствительностью опорного (эталонного) акселерометра, закрепляемого также на вибростоле калибратора. Так как отношение отдаваемых калибруемым и опорным акселерометрами электрических сигналов пропорционально отношению их чувствительностей, на основе этого отношения и заранее определенной чувствительности опорного акселерометра можно точно определить искомую чувствительность калибруемого акселерометра.

К другим областям применения портативного калибратора фирмы Брюль и Кьер относится проверка виброизмерительных и анализирующих систем. Используемый позже в ходе измерения и анализа акселерометр закрепляется на вибростоле калибратора и подвергается воздействию механических колебаний с ускорением 10 м/с^2 . При этом можно проверить показание измерительного прибора или цифрового индикатора измерительной системы и, при применении самописца или магнитофона, записать опорное ускорение 10 м/с^2 для последующей расшифровки результатов измерения и анализа.

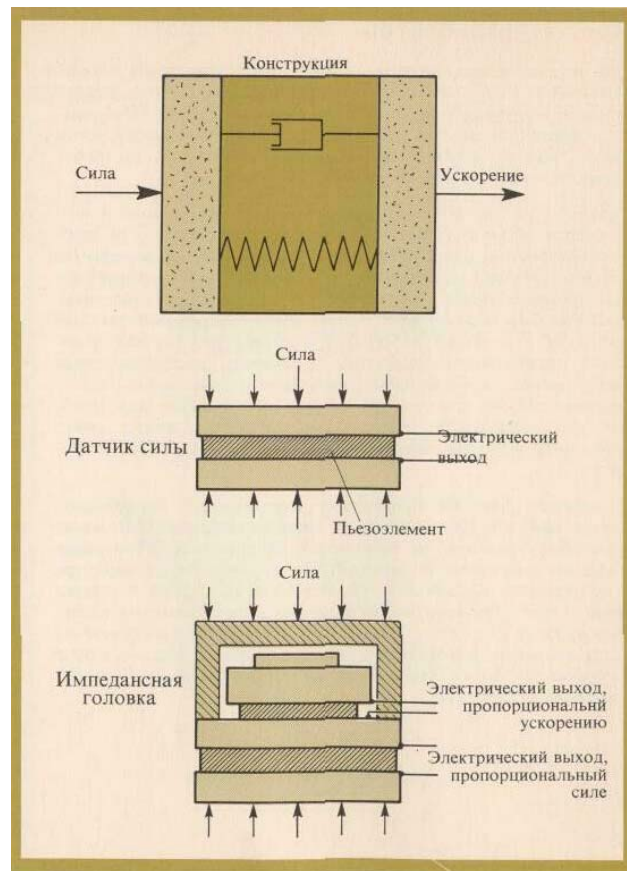


Измерение силы и механического импеданса

Для определения динамических сил и результирующих колебательных движений конструкций используются одновременно акселерометры и датчики силы. Динамическое движение и возбуждающая сила определяют механический импеданс конструкции или системы.

Датчик силы имеет пьезоэлектрический элемент, сжатие которого результирует в отдаче электрического сигнала, пропорционального воздействующей на датчик силе. Для измерения, анализа и обработки отдаваемых датчиками силы сигналов можно применять аппаратуру, используемую нормально вместе с пьезоэлектрическими акселерометрами.

Чтобы дать возможность определения точечного импеданса легких и нежестких конструкций, акселерометр и датчик силы помещены в один корпус. Такие комбинированные датчики называются импедансными головками. Однако, в ходе большинства измерений механического импеданса применяются сепаратные акселерометры и датчики силы.



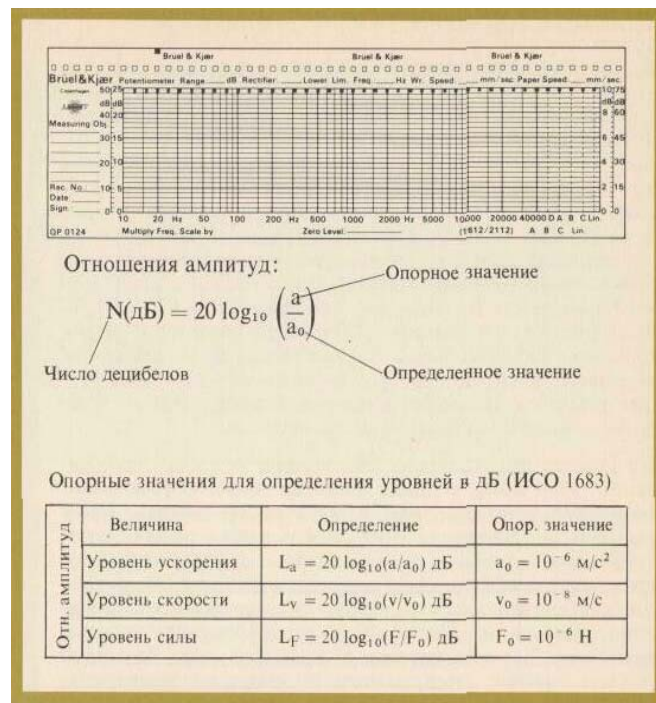
Логарифмические шкалы и децибелы

В технической практике часто применяется логарифмическая шкала частоты, обеспечивающая расширение области низких частот и сжатие области высоких частот и, следовательно, идентичное относительное разрешение по частоте. Логарифмической шкале также отдается предпочтение при графическом представлении широкого частотного диапазона на бумаге с относительно небольшими размерами.

Логарифмическая шкала также эффективна при графическом представлении амплитуд механических колебаний и к ее преимуществам относится возможность применения относительных единиц при сравнении уровней этих колебаний. Наиболее распространенной относительной единицей, относящейся к логарифмической шкале, является децибел (дБ), определяемый отношением определенного и опорного значений соответствующей величины механических колебаний. Отметим, что для вычисления абсолютных значений из уровней в дБ необходимо определение соответствующего опорного значения.

Например, без более подробного разъяснения можно сказать, что один уровень механических колебаний на 10 дБ больше другого уровня. Однако, если сказать, что уровень определенной величины механических колебаний равен 85 дБ, необходимо одновременно определить соответствующее опорное значение. Следовательно, более точным является предложение: уровень скорости механических колебаний равен 85 дБ отн. 10^{-6} м/с.

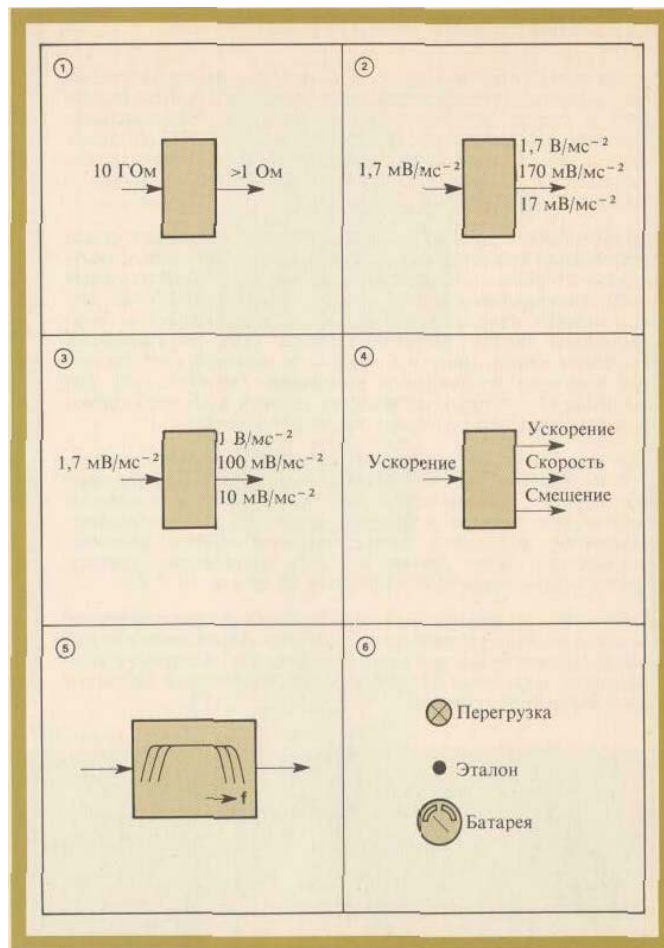
Отметим, что до сих пор не приняты общие опорные значения отдельных величин механических колебаний. Предложенные для нормализации опорные значения механических величин, используемые при вычислении их уровней в дБ, приведены в таблице в правой части этой страницы.



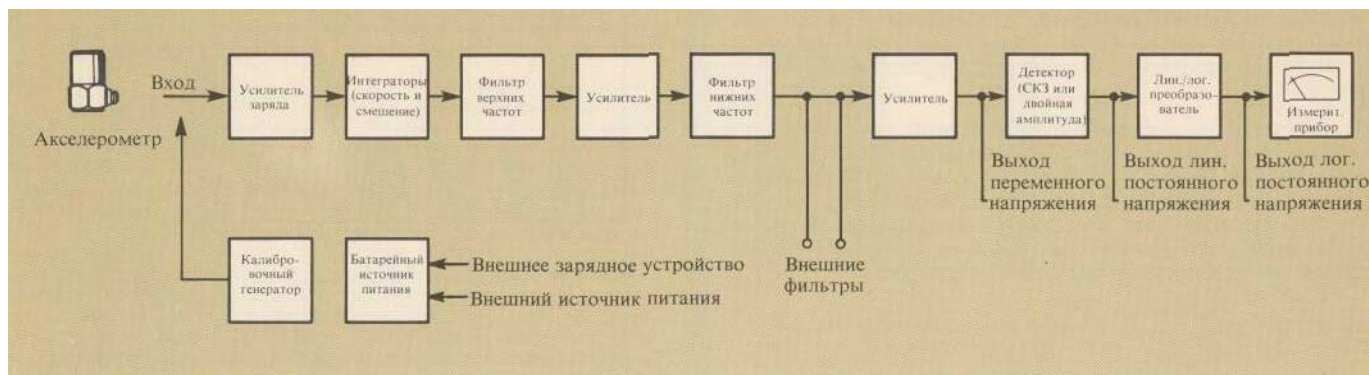
Причины применения предусилителей

Подключение нагрузки (даже с относительно большим импедансом) непосредственно к выходу пьезоэлектрического акселерометра может быть причиной значительного уменьшения его чувствительности и сужения его рабочего частотного диапазона. Чтобы уменьшить до минимума это нежелательное влияние нагрузки, вместе с акселерометром используется соответствующий предусилитель. Основной задачей предусилителя является преобразование высокого выходного импеданса акселерометра в более низкий импеданс, оптимальный с точки зрения относительно низкого входного импеданса измерительной и анализирующей аппаратуры (1). Отметим, что при применении измерительных усилителей, анализаторов и электронных вольтметров необходим дополнительный предусилитель, в то время как виброметры и другие приборы, рассчитанные на совместную эксплуатацию с пьезоэлектрическими акселерометрами, нормально снабжены внутренним предусилителем.

Большинство предусилителей обеспечивает не только преобразование импеданса, а также усиление и/или формирование отдаваемого акселерометром электрического сигнала. Предусилитель (2), например, имеет калиброванный и регулируемый коэффициент усиления и усиливает сигнал до нужного для измерительной, анализирующей или регистрирующей аппаратуры уровня. Предусилитель (3) с плавно регулируемым коэффициентом усиления дает возможность «нормализации» сигнала, отдаваемого акселерометрами с некруглой или неудобной чувствительностью. Предусилитель (4) имеет внутренние электронные интеграторы для преобразования пропорционального ускорению сигнала в сигналы, пропорциональные скорости и смещению. Предусилители могут также быть снабжены внутренними фильтрами (5), определяющими рабочий частотный диапазон системы в области низких и высоких частот и эффективно подавляющими электрический шум и другие помехи. К особенностям современных предусилителей часто относится присутствие индикаторов перегрузки, калибровочных и опорных генераторов, индикаторов состояния внутренних батарей и ДР. (6).



Виброметр



Приведенная на рисунке блок-схема иллюстрирует конструкцию и принцип действия современного виброметра. Акселерометр соединяется с усилителем заряда, образующим входной каскад прибора и отличающимся входным импедансом порядка нескольких ГОм. Усилитель заряда во входном каскаде исключает необходимость применения внешнего предусилителя и дает возможность соединения акселерометра и виброметра длинным кабелем (допускаются кабели длиной до нескольких сот метров) без заметной потери чувствительности системы.

Каскад электронных интеграторов обеспечивает измерение как ускорения, так и скорости и смещения механических колебаний.

Предусмотренные фильтры верхних и нижних частот можно настраивать согласно требованиям к ширине анализируемой полосы частот и/или рабочему частотному диапазону используемого акселерометра. Эти фильтры также эффективно подавляют помехи, обусловленные низко- и высокочастотными шумами. С выходом усилительного каскада, обеспечивающего нужное усиление сигнала, соединен детектор, отдающий пропорциональное измеряемой величине постоянное напряжение.

Это напряжение затем подается на измерительный или регистрирующий прибор. Детектор определяет среднее или среднеквадратичное значение или двойную амплитуду подлежащего измерению сигнала и в его каскаде может быть также предусмотрено запоминающее устройство, хранящее максимальное значение сигнала. Запоминающее устройство особенно эффективно при измерении механических ударов и кратковременных (переходных) процессов.

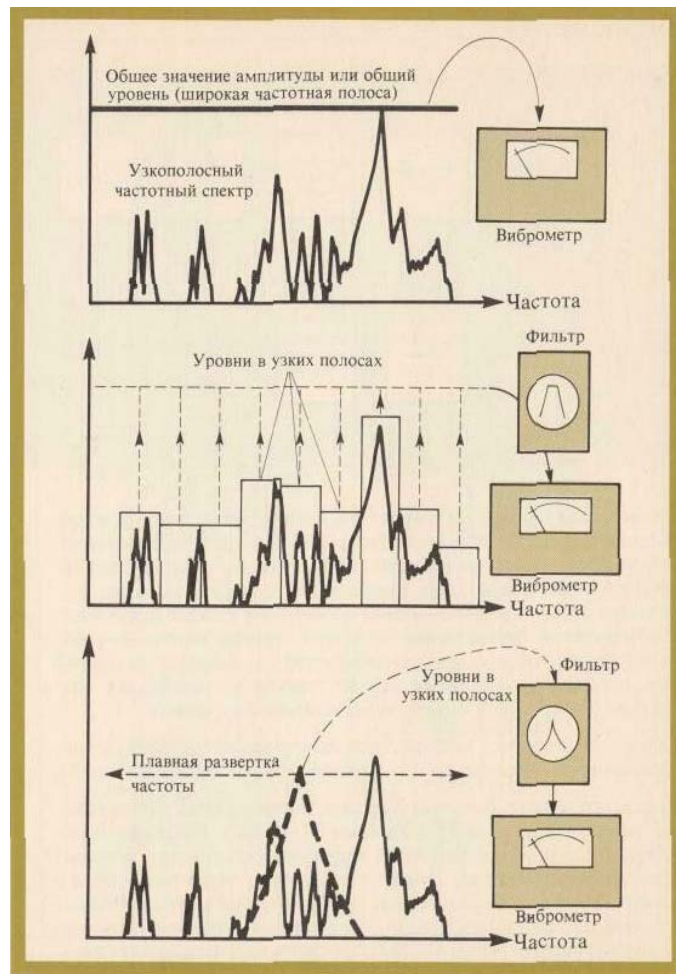
После преобразования в каскаде линейно-логарифмического преобразователя измеряемый сигнал поступает на измерительный прибор с логарифмической шкалой, перекрывающей две декады.

Вместе с виброметром можно применять внешние фильтры, обеспечивающие частотный анализ исследуемых механических колебаний. Виброметр также снабжен выходами переменного и постоянного напряжений, предусмотренными для подключения осциллографов, измерительных магнитофонов и регистрирующих приборов, например, самописца уровня.

Частотный анализ

Виброметр измеряет общие значения или общие уровни исследуемых механических колебаний, относящиеся к более или менее широкой полосе частот. Для определения отдельных составляющих широкополосного процесса необходим частотный анализ.

При частотном анализе используются избирательные фильтры, пропускающие только составляющие анализируемого процесса, находящиеся в соответствующих узких частотных полосах. Полосы пропускания фильтров перекрывают анализируемый частотный диапазон, так что результатом анализа является ряд значений или уровней, измеряемых соответствующим электронным прибором в отдельных узких полосах.



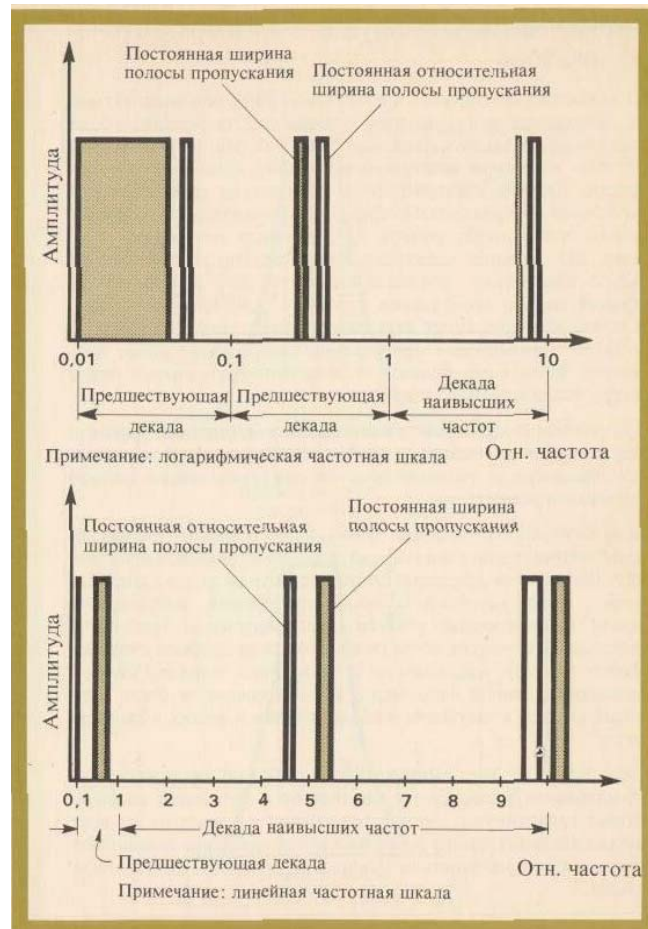
Частотный анализатор может иметь набор полосовых фильтров, настроенных на определенные частоты и переключаемых автоматически или вручную, или он может содержать лишь один полосовой фильтр, плавно настраиваемый в определенном частотном диапазоне.

Частотный анализ анализатором с постоянной шириной полосы пропускания и постоянной относительной шириной полосы пропускания

Существуют два основных типа частотных анализаторов: анализаторы с постоянной абсолютной шириной полосы пропускания и анализаторы с постоянной относительной шириной полосы пропускания. Первый тип снабжен одним или несколькими фильтрами с точно определенной фиксированной шириной полосы пропускания, например, 3 Гц, 10 Гц и т.п. Анализаторы второго типа имеют фильтр или фильтры, ширина полосы пропускания которого или которых всегда равна определенной доле (в %) его или их средней частоты, т. е. частоты настройки, например, 3%, 10 % и т. д. Приведенные на рисунке графики иллюстрируют зависимость ширины полосы пропускания обоих типов частотных анализаторов от частоты. Отметим, что ширина полосы пропускания анализатора с постоянной относительной шириной полосы кажется фиксированной при применении логарифмической шкалы частоты, удобной для перекрытия широкого диапазона частот. При сравнении вышеописанных анализаторов на основе линейного масштаба частоты наглядно фиксированное разрешение по частоте анализатора с постоянной шириной полосы пропускания. Линейная шкала частоты также иллюстрирует увеличение абсолютной ширины полосы пропускания анализатора с постоянной относительной шириной полосы с ростом частоты.

Ни теория, ни практика не дает общего и исчерпывающего ответа на вопрос о том, которому из вышеописанных анализаторов отдать предпочтение при анализе механических колебаний. Анализатор с постоянной относительной шириной полосы пропускания довольно хорошо соответствует реакции находящихся под воздействием динамических сил механических систем и его применение дает возможность графической регистрации частотных спектров на относительно коротких участках бумаги для записи. Следовательно, относящимся к этому типу анализаторам отдается предпочтение в большинстве областей практической виброметрии.

К преимуществам анализаторов с постоянной шириной полосы пропускания относится высокая разрешающая способность, так что они находят применение при гармоническом анализе, анализе ударов и т. д.



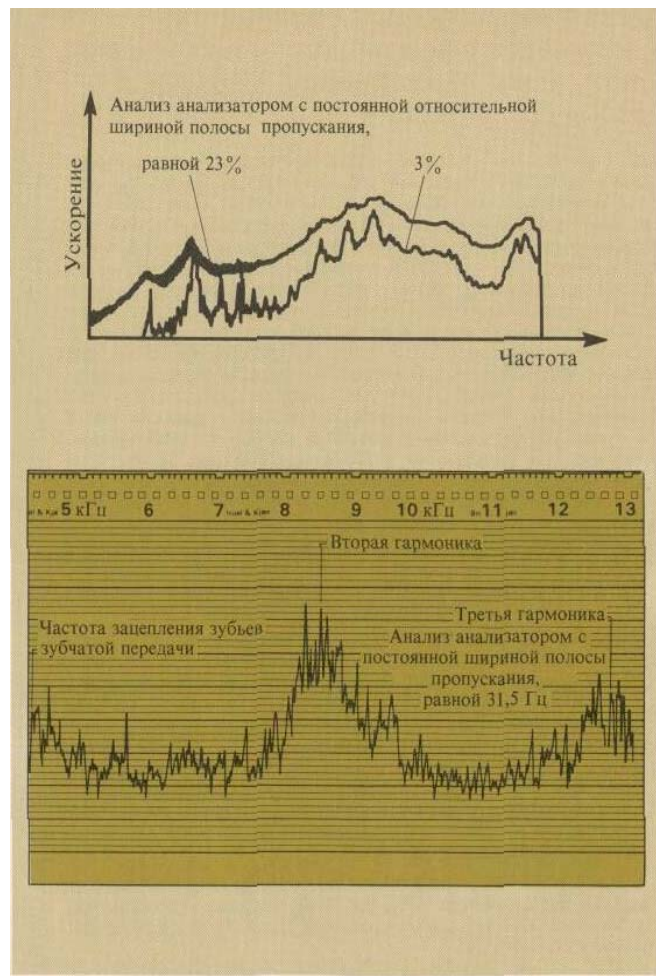
Ширина полосы пропускания частотного анализатора

Разрешающая способность фильтра или фильтров анализатора, т. е. ширина его или их полосы пропускания, определяет общее разрешение по частоте частотного анализа. На рисунке вправо показаны частотные спектры механических колебаний коробки передач. Верхняя спектрограмма записана на самописце при применении анализатора с постоянной относительной шириной полосы пропускания, равной 23% частоты настройки, в то время как нижняя спектрограмма представляет результат анализа идентичного процесса анализатором с относительной шириной полосы пропускания, равной 3% частоты настройки. На основе сравнения этих двух спектрограмм можно заключить, что более узкая полоса пропускания способствует более подробному частотному анализу и выделению отдельных пиков спектра анализируемого процесса.

Отрицательной стороной узкополосного частотного анализа является время, необходимое для анализа определенного частотного диапазона и увеличивающееся при уменьшении полосы пропускания анализатора.

Поскольку узкополосный частотный анализ широкого диапазона частот занимает длительное время, в виброметрической практике часто применяется предварительный частотный анализ анализатором с более широкой полосой пропускания, выделяющий важные и интересные участки, анализируемого частотного диапазона. Эти участки затем подвергаются подробному узкополосному анализу. Анализаторы с постоянной шириной полосы пропускания, равной например 3 Гц, обеспечивают очень подробный анализ, в частности в области более высоких и высоких частот.

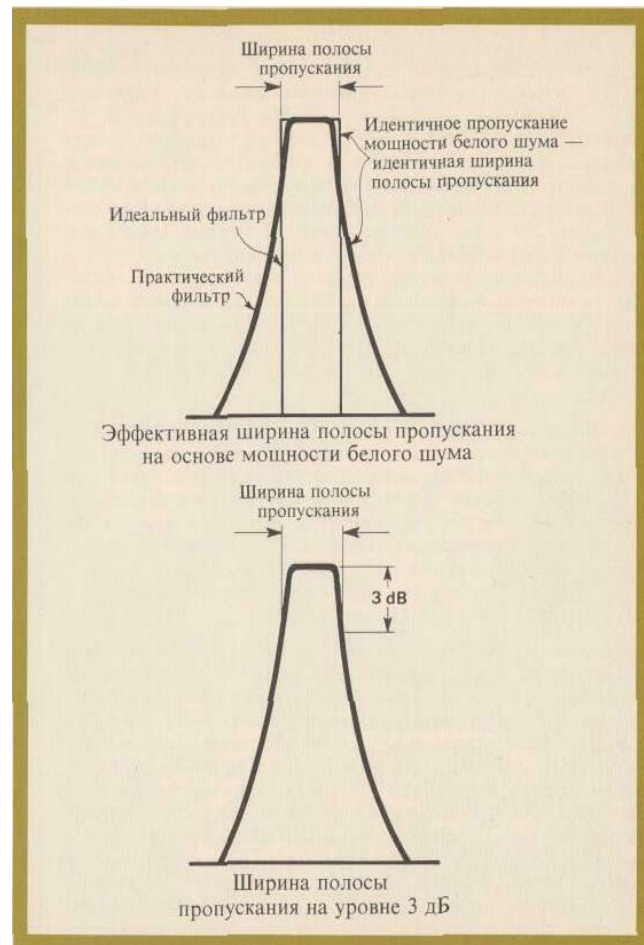
Чтобы подвести итог вышесказанному, можно заключить, что оптимальными являются тот анализатор и тот метод анализа, которые гарантируют нужное разрешение по частоте во всех участках анализируемого диапазона и одновременно выдвигают минимальные требования в отношении нужного для анализа времени.



Определение ширины полосы пропускания фильтра

Идеальный полосовой фильтр является фильтром, пропускающим без ослабления все составляющие с частотами внутри полосы пропускания и совершенно заграждающим все составляющие, частоты которых находятся вне этой полосы. Однако, практические пассивные и активные полосовые фильтры несколько отличаются от идеального фильтра, в частности в отношении менее крутого наклона их кривой частотной характеристики и, следовательно, пониженного заграждения вне полосы пропускания. Это поднимает важный вопрос об определении ширины полосы пропускания практических фильтров.

Существуют два основных способа определения ширины полосы пропускания фильтров. Наиболее широко принято определение ширины полосы пропускания практического фильтра через ширину полосы пропускания идеального фильтра, пропускающего идентичную мощность белого шума как и практический фильтр. Согласно второму способу ширина полосы пропускания фильтра равна интервалу частот, определяемому точками спада частотной характеристики фильтра на 3 дБ отн. уровня в полосе пропускания. Отметим, что оба эти способа определения ширины полосы пропускания фильтра дают отличающиеся существенно друг от друга результаты только в случае фильтров с относительно низкой разрешающей способностью.

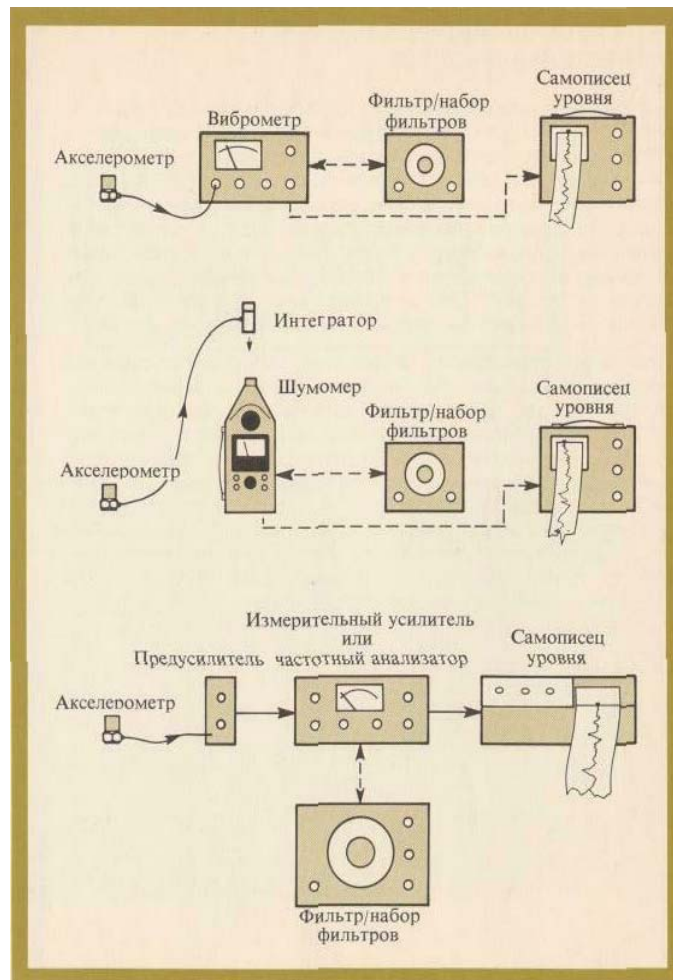


Виброизмерительная аппаратура

Наиболее универсальным, эффективным и удобным в эксплуатации виброметрическим прибором является виброметр общего назначения, описанию которого посвящена стр. 27 данной брошюры. Однако, при измерении и анализе механических колебаний, в частности в полевых условиях, также эффективны портативные батарейные шумомеры фирмы Брюль и Кьер, микрофон которых заменяется интегратором и акселерометром. Хотя эти приборы измеряют среднеквадратичные значения ускорения, скорости и смещения, в их входном каскаде не предусмотрен усилитель заряда и при изменении подлежащего измерению параметра необходима их повторная калибровка. Вместе с вышеупомянутыми приборами можно применять работающие от батарей фильтры, обеспечивающие октавный, третьоктавный и узкополосный анализ механических колебаний.

К преимуществам работающих от сети лабораторных приборов относятся высокая точность, надежность и универсальность, в частности в отношении возможности подробного анализа и обширной обработки данных. Основная виброизмерительная система содержит акселерометр, предусилитель и измерительный усилитель с возможностью подключения внешних фильтров. Измерительный усилитель и фильтры часто собраны в одном общем корпусе, образуя тем самым частотный анализатор или спектрометр.

Самыми совершенными, особенно с точки зрения высокой рабочей скорости, удобной эксплуатации и большого количества обрабатываемых данных, являются анализаторы, работающие в реальном масштабе времени. Эти анализаторы обеспечивают сверхбыстрый одновременный анализ относительно большого числа частотных полос и выдачу результатов в реальном времени. Результаты анализа отображаются на экране электроннолучевой трубки и в цифровой форме наносятся на внешний перфоратор ленты, вычислительную машину или другой приемник цифровых данных. Так как анализаторы в реальном времени обычно снабжены устройствами дистанционного управления, они находят широкое применение в автоматических виброизмерительных системах.



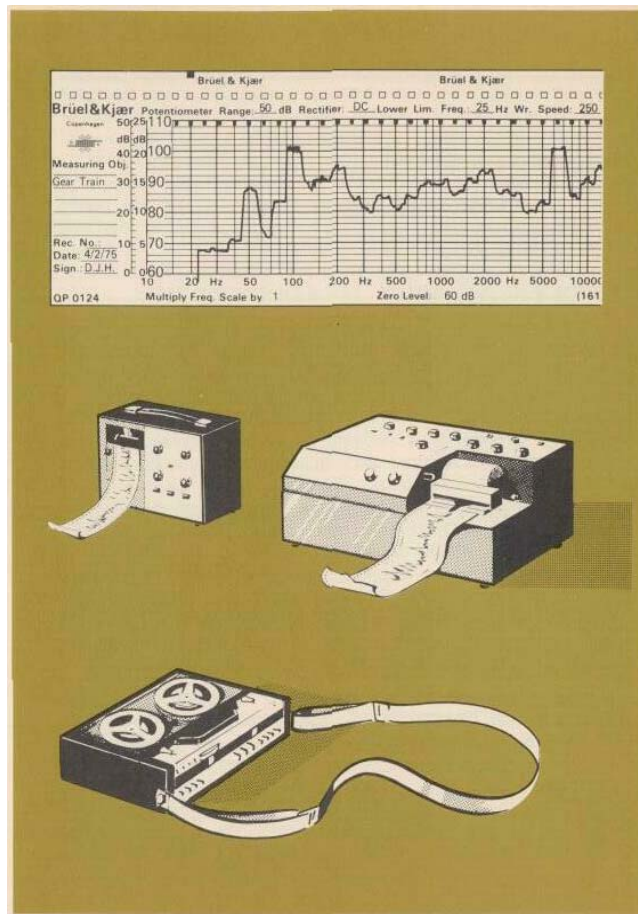
Регистрация результатов

Ручная запись результатов виброметрических измерений является слишком медленным и затруднительным процессом, в частности, при большом объеме измерений и частотном анализе механических колебаний. Изготавливаемые и выпускаемые фирмой Брюль и Кьер самописцы уровня автоматически регистрируют на бумажной ленте с отпечатанными шкалами результаты измерения и анализа в функции или времени, или частоты. Для работы в полевых условиях предусмотрены портативные батарейные самописцы уровня, в то время как в лабораторных условиях отдается предпочтение работающим от сети самописцам уровня, рассчитанным на автоматическую работу в сложных измерительных и анализирующих системах.

В виброметрической практике широко распространено применение измерительных магнитофонов, особенно эффективных при записи в полевых условиях и последующем анализе записанных на магнитной ленте процессов в лаборатории. Воспроизведение при повышенной скорости движения ленты дает возможность частотного преобразования низкочастотных процессов в рабочий диапазон нормальных частотных анализаторов и одновременно способствует уменьшению нужного для анализа времени.

Измерительные магнитофоны также эффективны при измерении и анализе импульсных и кратковременных процессов, например, механических ударов или возбуждаемых поездами механических колебаний мостов и др. Ограниченная продолжительность таких процессов исключает возможность их анализа нормальными частотными анализаторами и приводит к необходимости применения измерительного магнитофона, снабженного бесконечной петлей ленты с записью исследуемого процесса. При повторном воспроизведении можно записанный на ленте процесс считать периодическим и подвергать нормальному частотному анализу.

Для записи и воспроизведения кратковременных процессов предусмотрены цифровые регистрирующие приборы, к достоинствам которых относится очень широкий диапазон частотного преобразования.



Применение результатов измерения и анализа механических колебаний

Широкополосные виброметрические измерения дают ценные предварительные результаты, хорошо применимые при быстрой оценке исследуемого процесса, например оценке состояния машин или эффективности виброизоляции и т. д. Результаты виброметрических измерений обычно сравниваются друг с другом и оцениваются согласно легализованным критериям опасности и строгости механических колебаний. Пример таких критерий иллюстрирует график на рисунке вправо, выбранный из стандартов и рекомендаций по оценке опасности механических колебаний машин вращательного действия (ИСО 2372 и 2373, VDI 2056: 1964, BS 4675: 1971 и DIN 45 665: 1968).

Для диагностики, используемой например в процессе разработки новых машин, необходим частотный анализ. В частотном спектре можно всегда обнаружить составляющие, относящиеся непосредственно к определенным возбуждающим силам и/или основным функциям машин и их отдельных узлов. Почти все спектры механических колебаний содержат также важные составляющие с частотами, связанными с движениями отдельных узлов и деталей машины, механизма и т. д. Самыми важными обычно являются гармоники одной или нескольких основных частот. Причиной присутствия гармоник бывает искажение формы волны колебаний с основными частотами и несинусоидальные периодические движения. Частоты гармоник могут совпадать с резонансными частотами определенных деталей или элементов конструкций, значительно усиливаться и образовать серьезный источник акустического шума или динамической силы, сообщаемой другим механическим элементам.

Деформация зубьев зубчатых колес при нагрузке и их износ являются источниками механических колебаний с частотами, соответствующими частотам зацепления и их гармоникам. Присутствие периодических изменений, обусловленных например эксцентricностью колес, способствует созданию боковых полос, сопровождающих вышеупомянутые составляющие. Первые верхняя и нижняя боковые полосы нормально расположены на частотах, равных частоте зацепления (f_z) плюс и минус частота вращения зубчатого колеса (f_d), вторые боковые полосы



на частотах $f_z \pm 2f_d$ и т. д. Отдельные гармоники частоты зацепления могут также иметь собственные боковые полосы (например, $2f_z \pm f_g$ и т. д.).

Так как на практике часто невозможно изменение частоты возбуждающих сил (скорости вращения валов, передаточные отношения и т. д.), механические колебания ослабляются и гашатся другими способами. К специальным методам ослабления и гашения механических колебаний относятся искусственное расстраивание (изменение резонансной частоты) отдельных элементов конструкций путем изменения их массы или жесткости, виброизоляция и амортизирование (демпфирование) с помощью специальных амортизаторов и демпфирующих материалов.

Механические колебания в качестве показателя состояния машин

Отказу в работе большинства машин нормально предшествует ряд явлений, указывающих на возможность дефекта или аварии. Характерным явлением, сопровождающим почти всегда неисправную работу машин, является увеличение их механических колебаний. Это увеличение можно наблюдать при измерении даже на внешних поверхностях машин. Следовательно, механические колебания удобно и эффективно использовать в качестве показателя состояния машин и других механических систем. Приведенный на рисунке вправо график является зависимостью уровня механических колебаний от времени и иллюстрирует наглядно вышесказанное. Планово-предупредительный ремонт осуществляется обычно по регулярным интервалам времени, определенным на основе предполагаемого срока службы изнашивающихся узлов и деталей. Однако, ремонт можно отсрочить и осуществить в тот момент, когда результаты измерения механических колебаний покажут его необходимость. Такой метод исключает излишний ремонт, сокращает простои в работе и уменьшает эксплуатационные расходы машин.

Профилактический контроль и уход за оборудованием, основанный, на измерении и анализе механических колебаний, выгоден именно с экономической точки зрения, так как он дает возможность увеличения среднего времени между отказами и одновременно исключает неожиданные аварии оборудования. Профилактические методы широко используются в промышленности, в частности в промышленности с непрерывными технологическими процессами.

Максимальную и допустимую до ремонта амплитуду или уровень механических колебаний необходимо определить на основе экспериментов и опыта. В настоящее время более или менее широко принято полагать началом «действия» (подготовки к ремонту) тот момент, когда амплитуды механических колебаний в 2—3 раза (т. е. на 6—10 дБ) превышают амплитуды при нормальной работе.

В предыдущих разделах показано, что частотный анализ дает возможность обнаружения и определения многих источников



механических колебаний. Следовательно, частотный спектр механических колебаний машины или другой механической системы, полученный при ее нормальной эксплуатации, может служить в качестве ее опорного параметра. Сравнение этого опорного спектра со спектрами, получаемыми в течение срока службы оборудования, помогает не только при определении времени ремонта, а также при обнаружении причин неполадок и отказов в работе.

Приведенные на следующих двух страницах диагностические таблицы могут помочь при обнаружении источников и причин излишних механических колебаний, частоты которых можно определить методами частотного анализа.

Таблица для отыскания неисправностей (А)

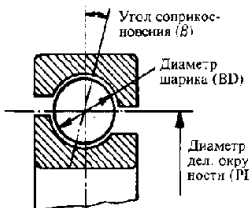
Причина неисправности	Частота преобладающей составляющей механических колебаний (Н = об/м/60)	Направление	Примечания
Дисбаланс вращающихся элементов	1 х об/м	Радиальное	Частая причина сильных механических колебаний машин и оборудования
Несоосность и изгиб валов	Обычно 1 х об/м, часто 2 и 3 об/м и некогда также 3 и 4 х об/м	Радиальное и осевое	Частая причина механических колебаний
Повреждение деталей подшипников (шарики, ролики и др.)	Частоты толчков отдельных деталей* и высокие частоты (20—60 кГц)	Радиальное и осевое	Нерегулярные амплитуды механических колебаний, часто механические удары *Частоты толчков:  Угол соприкосновения (β) Диаметр шарика (BD) Диаметр дел. окружности (PD) n = число шариков или роликов f_r = угл. скорость вращения внутренней и внешней обоймы <u>Частота толчков f (Гц)</u> При повреждении внешней обоймы $f(\Gamma_0) = \frac{n}{2} f_r \left(1 - \frac{BD}{PD} \cos \beta \right)$ При повреждении внутренней обоймы $f(\Gamma_0) = \frac{n}{2} f_r \left(1 + \frac{BD}{PD} \cos \beta \right)$ При повреждении шарика $f(\Gamma_0) = \frac{PD}{BD} f_r \left[1 - \left(\frac{BD}{PD} \cos \beta \right)^2 \right]$
Качка подшипников скольжения в корпусах	Субгармоники скорости вращения валов, точно 1/2 или 1/3 х об/м	Преобладает радиальное	Качка встречается только при рабочих скорости вращения и температуре (см. турбоагрегаты)
Турбулентное движение масляной пленки в подшипниках	Несколько меньше половины скорости вращения вала (42—48 % об/м)	Преобладает радиальное	Относится к быстродействующему оборудованию (турбоагрегаты и др.)

Таблица для отыскания неисправностей (Б)

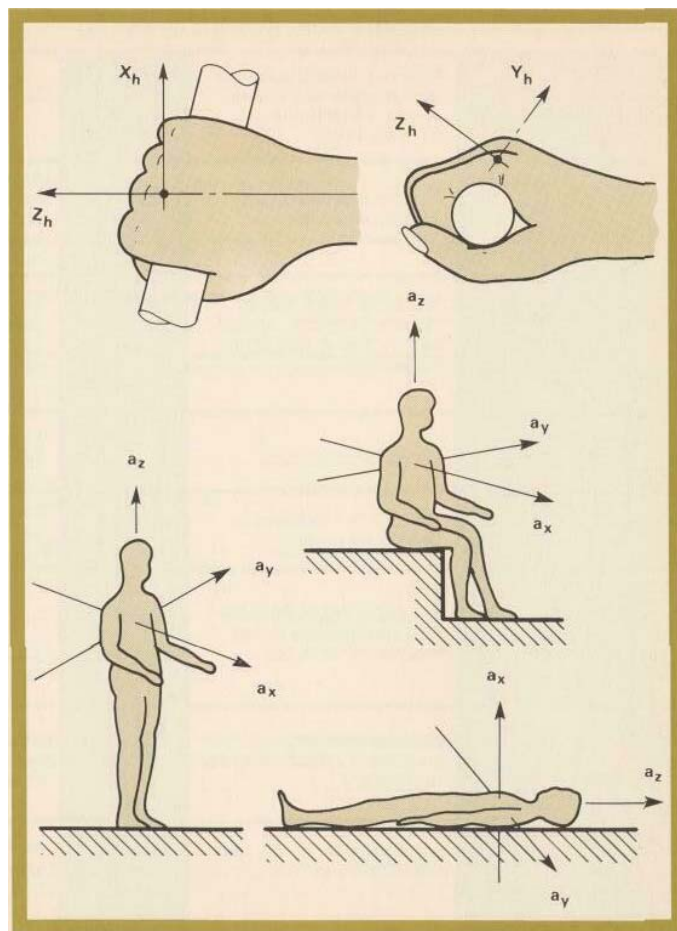
Причина неисправности	Частота преобладающей составляющей механических колебаний (Н - об/м/60)	Направление	Примечания
Турбулентное движение из-за гистерезиса	Критическая скорость вращения валов	Преобладает радиальное	Механические колебания, возникающие на критической скорости, не исчезают при дальнейшем увеличении скорости вращения и могут быть в некоторых случаях уменьшены путем увеличения плотности посадки и тугости затяжки элементов ротора
Поврежденные или изношенные зубчатые передачи	Частоты зацепления зубьев (скорость вращения $\times$ число зубьев) и гармоники	Радиальное и осевое	Присутствие боковых полос вокруг частот зацепления сигнализирует о модуляции (эксцентриситет и др.) частотой, соответствующей интервалу боковых полос. Для обнаружения необходим узкополосный частотный анализатор
Большие зазоры, разболтанность	2 $\times$ об/м		Механические колебания с частотами, соответствующими субгармоникам и гармоникам (см. качку подшипников скольжения)
Поврежденные ременные передачи	1, 2, 3 и 4 $\times$ скорость движения ремня	Радиальное	
Неуравновешенные силы и пары сил, изменяющие направление	1 $\times$ об/м и/или больше при дисбалансе более высокого порядка	Преобладает радиальное	
Сильные турбулентные движения	Рабочие частоты лопаток и лопастей и их гармоники	Радиальное и осевое	Увеличение амплитуд обусловленных турбулентным движением механических колебаний сигнализирует о усилении турбулентности
Колебания, возбуждаемые электромагнитным полем	1 $\times$ об/м или 1 — 2 $\times$ синх. частота	Радиальное и осевое	Механические колебания должны исчезать при выключении электроснабжения оборудования

Механические колебания и организм человека

Уже в течение относительно длительного времени известно серьезное влияние механических колебаний на организм человека. Механические колебания могут быть причиной неясного видения, потери концентрации, раздражения, понижения трудоспособности и др. В некоторых случаях могут колебания определенных частоты и уровня даже вызывать постоянные повреждения внутренних органов человека.

Научные и исследователи уже более 30 лет занимаются психологическими эффектами механических колебаний, в частности колебаний, генерируемых ручными инструментами с механическим, пневматическим и электрическим приводом. Среди работников лесной промышленности, применяющих цепные пилы, хорошо известен синдром «белых пальцев». Постепенное перерождение нервной и сосудистой ткани приводит к потерям осязания и манипуляционной способности рук этих работников.

В настоящее время интенсивно готовятся критерии и рекомендации, определяющие допустимые пределы и максимальные спектры механических колебаний ручек и рукояток ручных инструментов с механическим, пневматическим и электрическим приводом.



Механические колебания и организм человека

Первым документом, относящимся к влияниям механических колебаний на организм человека и принятым в международном масштабе, является рекомендация 2631 Международной организации по стандартизации (ИСО), опубликованная в 1978 г. В этой рекомендации даются пределы механических колебаний с частотами в диапазоне от 1 до 80 Гц (т. е. в диапазоне наибольшей чувствительности организма человека к вибрации), воздействующих на человека по интервалам времени от 1 мин до 12 ч. Рекомендация ИСО 2631 относится к случаям, когда механические колебания поступают на тело человека через ноги в стоячем положении, ягодицы в сидячем положении и опорные поверхности в лежачем положении, и предлагает следующие критерии оценки раздражительных и вредных эффектов механических колебаний: 1) предел хорошего самочувствия, используемый, например, в пассажирском движении, 2) предел понижения работоспособности из-за усталости, важный именно для шоферов, операторов, машинистов и др. и 3) предел максимальной экспозиции, превышение которого опасно для здоровья.

Отметим, что в продольном направлении, т. е. в направлении от ног к голове, организм человека наиболее чувствителен к колебаниям с частотами от 4 до 8 Гц, в то время как в поперечных направлениях наблюдается максимальная чувствительность к механическим колебаниям с частотой 1 — 2 Гц.

Фирма Брюль и Кьер изготавливает и выпускает специальный батарейный виброметр, измеряющий механические колебания с учетом их неблагоприятных или даже вредных влияний на организм человека.

Московский Технический Центр Компании Brüel&Kjær.
103287, Москва Петровско-Разумовский пр. 29, 4 этаж
Тел. (095)212-39-03; Факс(095)733-90-48;
E-mail: info@asmtm.dol.ru

